

---

# **Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jan Holger Sprute  
Geboren am 23.01.1977  
in Detmold

Referent: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker

Tag der Einreichung: 29.09.2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.2012

D17  
Darmstadt 2012

---

---

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-29479

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2947>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,  
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>  
[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik, Teil des Instituts für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt.

Mein spezieller Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh für die Betreuung der Arbeit, die Möglichkeiten zur freien Entfaltung und die Unterstützung bei allen Vorhaben, auch abseits der eigentlichen Forschungstätigkeit. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker für die Übernahme des Korreferats.

Besonderer Dank gebührt den Personen und Institutionen, deren persönliches Engagement und Interesse an den bearbeiteten Fragestellungen die Finanzierung des Projektes erst ermöglicht haben. Dies sind im besonderen Maße die AUDI AG, mit Enthusiasmus vertreten durch Dr.-Ing. Wolfgang Huhn, sowie die Bundesanstalt für Straßenwesen mit Herrn Rainer Krautscheid als Projektverantwortlichem.

Ich bin sehr froh, dass es mir vergönnt war, den Neuaufbau des Fachgebietes Lichttechnik mit zu gestalten und daher möchte ich insbesondere Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak für die Zusammenarbeit während der interessanten Zeit vor der Berufung Prof. Khanhs danken. In diesem Zusammenhang bin ich auch dem Stifterkreis Lichttechnik zu Dank verpflichtet, der mit seinem Engagement die Weiterführung des FGLT ermöglichte.

Kein Doktorand gelangt ohne die Unterstützung seines universitären Umfelds an sein Ziel und so gilt mein tiefer Dank allen Mitarbeitern des FG Lichttechnik, den beteiligten Studenten und den teilnehmenden Probanden. Hervorheben möchte ich hier dennoch meine Kollegen Nils Haferkemper, Andreas Groh und Christoph Schiller, die mir jederzeit mit Ihrer Hilfsbereitschaft, Optimismus und Fachkenntnis zur Seite standen, sowie den ehemaligen Studenten Verena Knobloch und Bastian Zydek, die wichtige Beiträge zu dieser Arbeit lieferten. Weiterer Dank geht an Dr.-Ing. Benjamin Hummel von der AUDI AG für die Organisation und Vorbereitung der gemeinsamen Versuche.

Meine tief empfundene Dankbarkeit gilt meiner gesamten Familie, speziell meinen Eltern und verstorbenen Großeltern, deren vorbehaltloser Unterstützung ich mir zu jeder Zeit sicher sein konnte und weiter sein kann. Im Besonderen gilt dies für meine Freundin Stefanie Heinke, die mich allzeit motiviert und inspiriert.

Darmstadt, im Februar 2012

Jan Holger Sprute



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>3</b>
1.1 Technische Entwicklung von Scheinwerfersystemen.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Motivation .....</b>	<b>6</b>
2.1 Charakteristik von Verkehrsunfällen .....	6
2.1.1 Länderspezifische Unterschiede bei Verkehrsunfällen.....	6
2.1.2 Potentiale von adaptiven Fernlichtsystemen zur Reduktion des Unfallrisikos .....	8
2.1.3 Lage der Unfallorte .....	8
2.1.4 Einfluss der Umgebungsleuchtdichte auf die Unfallhäufigkeit .....	10
2.1.5 Einfluss der Tageszeit und Umgebungsleuchtdichte auf die Unfallschwere .....	11
2.1.6 Einfluss der Beleuchtungssysteme auf die Unfallzahlen .....	13
2.1.7 Zusammenfassung der Daten zur Unfallforschung.....	14
2.2 Exemplarischer Unfallhergang .....	15
2.2.1 Unfallsituation .....	15
2.2.2 Theoretische Grundlagen.....	16
2.2.3 Durchführung der Begutachtung .....	17
2.2.4 Ergebnisse und Relevanz für diese Arbeit .....	17
2.3 Analyse der gesetzlichen Zulässigkeit .....	17
2.3.1 Straßenverkehrsordnung StVO .....	18
2.3.2 Verwaltungsvorschrift zur StVO .....	19
2.3.3 Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) .....	20
2.3.4 ECE-Regelungen .....	20
2.3.5 Japan .....	24
2.3.6 USA.....	24
2.3.7 Weitere Länder .....	25
2.3.8 Folgerungen über die gesetzliche Zulässigkeit .....	25
2.4 Stand der Technik von adaptiven Lichtsystemen.....	26

<b>3</b>	<b>Vergleich Performance Mensch – adaptive Fernlichtsysteme .....</b>	<b>29</b>
3.1	Bisherige Untersuchungen .....	29
3.2	Eigene Studie .....	31
3.2.1	Testkonzept .....	31
3.2.2	Analyse .....	32
3.2.3	Ergebnisse.....	32
3.3	Nachfolgende Untersuchungen .....	38
3.4	Zusammenfassung Fahrerverhalten .....	39
<b>4</b>	<b>Versuch Sichtweitenvergleich adaptive Fernlichtsysteme .....</b>	<b>40</b>
4.1	Bisherige Forschung.....	40
4.2	Eigene Untersuchungen .....	41
4.2.1	Versuchsaufbau.....	41
4.2.2	Testsysteme .....	43
4.2.3	Einflussfaktoren .....	43
4.2.4	Ergebnisse.....	44
4.2.5	Zukünftige Untersuchungen.....	49
4.3	Ergebnisse der Befragung.....	49
4.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und des Akzeptanztest.....	52
<b>5</b>	<b>Statische Untersuchungen zur Blendungsbegrenzung .....</b>	<b>53</b>
5.1	Grundlagen zur Blendung und Readaptation .....	53
5.1.1	Arten der Blendung.....	53
5.1.2	Ursache und Auswirkungen von psychologischer Blendung.....	55
5.1.3	Abhängigkeit vom Alter .....	56
5.1.4	Einfluss von Alkohol und Drogen.....	57
5.1.5	Messbarkeit der Blendung.....	58
5.2	Methoden.....	59
5.2.1	Versuchsaufbau.....	59
5.2.2	Durchführung der Messungen.....	60
5.3	Ergebnisse .....	64
5.3.1	Vergleichbarkeit von Blendungsbewertungen .....	65
5.3.2	Physiologische Blendung auf kurzen Entfernungen .....	65
5.3.3	Folgerungen aus den Blendversuchen mit geringem Abstand .....	67
5.3.4	Psychologische Blendung auf kurzen Entfernungen.....	67
5.3.5	Einfluss der Strahlungsspektren.....	68

5.3.6	Physiologische Blendung auf große Entfernungen .....	72
5.3.7	Ergebnisse der Langdistanzversuche .....	75
5.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse Langdistanzversuche .....	77
<b>6</b>	<b>Dynamische Blendungstests.....</b>	<b>78</b>
6.1	Entwurf einer Schaufgabe für eine dynamische Blendungsbestimmung .....	78
6.2	Versuchsaufbau .....	79
6.2.1	Darstellung der Schaufgabe über ein Head-Up-Display .....	80
6.2.2	Messen der Entfernung zur Blendquelle .....	82
6.2.3	Messen der Blendbeleuchtungsstärke .....	83
6.2.4	Bestimmung des Blendwinkels.....	83
6.2.5	Protokollierung und Integration in das Probandenfahrzeug .....	84
6.3	Software.....	85
6.3.1	Anforderungen an die Software und deren Umsetzung .....	85
6.4	Versuchsdurchführung und -auswertung .....	86
6.4.1	Aufbau und Durchführung .....	86
6.4.2	Auswertung der Ergebnisse.....	87
6.4.3	Auswertung der Dauer zwischen Rechteckdarstellung und Probandeneingabe .....	89
6.4.4	Dynamische Versuche zur Bestimmung der psychologischen Blendung .....	90
6.4.5	Ergebnisse der dynamischen Probandenversuche .....	91
6.5	Auswertung nach Reaktionszeit .....	95
6.6	Bewertung der Ergebnisse der dynamischen Versuche.....	95
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>97</b>
7.1	Ergebnisse der Arbeit .....	97
7.2	Anregungen für zukünftige Arbeiten.....	98
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>100</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten .....</b>	<b>109</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Fragebogen Akzeptanztest .....</b>	<b>111</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Ergebnisse des Blendungstests (psychologische Blendung) .....</b>	<b>114</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Ergebnisse der Begutachtung des Unfall Hof-Töpen .....</b>	<b>115</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Blendungstests (physiologisch, Abhängigkeit von Lichtart) .....</b>	<b>117</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Relevante Photometrische Anforderungen nach ECE-R123 an eine GLW .....</b>	<b>119</b>
<b>Anhang F</b>	<b>Aktivierungsbedingungen für verschiedene Abblendlichtklassen .....</b>	<b>122</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>123</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der Entwicklung der Anzahl bei Verkehrsunfällen Getöteter in verschiedenen Ländern und Weltregionen.....	7
Abbildung 2:	Örtliche Verteilung der Unfälle mit Verletzten oder Getöteten [18].....	9
Abbildung 3:	Anzahl der tödlichen Fußgängerunfälle pro Woche während der Dämmerungsstunden.....	11
Abbildung 4:	Anzahl der verunglückten Fußgänger nach Monaten und Unfallschwere in Deutschland.....	12
Abbildung 5:	Unfallrate in Abhängigkeit von Straßentyp und HID-Rate.....	13
Abbildung 6:	Unfallrate in Abhängigkeit von HID-Ausstattungsrate .....	13
Abbildung 7:	Anzahl der Verkehrsunfälle eingeteilt nach Verletzungsschwere [31].....	14
Abbildung 8:	Unfallort mit Versuchsperson und Hund. ....	15
Abbildung 9:	Mögliche Veränderung der Fernlichtverteilung innerhalb der Grenzen der ECE-R123 .....	22
Abbildung 10:	Fernlichtnutzung USA, Werte aus Beleuchtungsstärkemessung .....	29
Abbildung 11:	Fernlichtnutzung in USA, Werte generiert aus subjektiver Schätzung.....	29
Abbildung 12:	Fernlichtnutzung in USA, aufgeschlüsselt nach Straßenart .....	30
Abbildung 13:	Fernlichtnutzung in USA, aufgeschlüsselt nach Nutzeralter .....	30
Abbildung 14:	Schematischer Aufbau zur Studie Fernlichtnutzung.....	31
Abbildung 15:	Teststrecken Übersicht .....	31
Abbildung 16:	Anteil der Fernlichtnutzung auf Landstraßen.....	33
Abbildung 17:	Erhöhung der Fernlichtnutzung bei Sensibilisierung der Autofahrer.....	33
Abbildung 18:	Risikokompensation der Autofahrer durch Erhöhung der Geschwindigkeit.....	34
Abbildung 19:	Erhöhung des Anhaltewegs .....	35
Abbildung 20:	Verteilung des Fehlertyps 1 in Abhängigkeit von der Fehlerdauer (rechts) und der während des Fehlerzustandes gefahrenen Strecke (links).....	37
Abbildung 21:	Verteilung des Fehlertyps 2 in Abhängigkeit von der Fehlerdauer (rechts) und der während des Fehlerzustandes gefahrenen Strecke (links).....	37
Abbildung 22:	handgesteuertes VarioX-Modul, eingesetzt während statischer Sichtweitenversuche, Bild: Böhm (L-Lab, Universität Paderborn).....	38
Abbildung 23:	Übersicht über den Testparcours .....	42
Abbildung 24:	Grafische Übersicht über Mittelwerte und Standardabweichungen von Jobstvogt .....	47
Abbildung 25:	Vergleich der mittleren Detektionsentfernungen.....	48



Abbildung 26: Risikokompensation der Autofahrer durch Erhöhung der Geschwindigkeit.....	48
Abbildung 27: Blendungsszenario im Straßenverkehr. ....	54
Abbildung 28: Entstehung von physiologischer Blendung im Auge nach SCHMIDT-CLAUSEN. ....	55
Abbildung 29: Altersabhängigkeit der Blendung .....	57
Abbildung 30: Originale DeBoer-Skala .....	58
Abbildung 31: Standard-Sehaufgabe im Labor zur Blendungsmessung .....	59
Abbildung 32: Schematischer Versuchsaufbau .....	60
Abbildung 33: Messungen zur Ermittlung der Schwellenleuchtdichtedifferenz .....	61
Abbildung 34: Spektrale Abhängigkeit der psychologischen Blendung.....	62
Abbildung 35: Abhängigkeit des Blendempfindens von der Leuchtdichte bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge nach RAPHAEL.....	63
Abbildung 36: Abhängigkeit des Blendempfindens von der Wellenlänge bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge nach FEKETE. Blendwinkel $\Theta = 0^\circ$ .....	63
Abbildung 37: Scheinwerferrack mit 3 verschiedenen SW-Technologien .....	64
Abbildung 38: Abhängigkeit zwischen kontinuierlicher und DeBoer-Bewertung mit Regressionsgeraden .....	65
Abbildung 39: Abhängigkeit zwischen Schwellenleuchtdichtedifferenz und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung .....	66
Abbildung 40: Abhängigkeit zwischen Weberkontrast des Sichtzieles und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung .....	66
Abbildung 41: Maximal zulässige Lichtstärken in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand. ....	67
Abbildung 42: Abhängigkeit zwischen kontinuierlicher Blendungsbewertung und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung .....	68
Abbildung 43: Maximal zulässige Lichtstärken in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand um die angegebene Blendbewertung nicht zu überschreiten. ....	68
Abbildung 44: Messpunkte und Regression der Abhängigkeit von $\Delta L$ von der Blendbeleuchtungsstärke für Testperson Nr. 8.....	69
Abbildung 45: Messpunkte und Regression der Abhängigkeit von CW von der Blendbeleuchtungsstärke für Testperson Nr. 8.....	69
Abbildung 46: Abhängigkeit der psychologischen Blendung von der logarithmierten Blendbeleuchtungsstärke ( $E_0 = 1lx$ ) für eine Testperson.....	71
Abbildung 47: Achsenabschnitts-Steigungs-Diagramm für jede durchgeführte Regression.....	71
Abbildung 48: Abhängigkeit der psychologischen Blendung von der logarithmierten Blendbeleuchtungsstärke .....	74
Abbildung 49: Korrelation zwischen physiologischer Blendung und Blendbeleuchtungsstärke. ....	75
Abbildung 50: Auswertung der Steigungsfaktoren R .....	77
Abbildung 51: Snellen-Buchstabe .....	78

Abbildung 52: Sehaufgabe mit Rechteck und Fixpunkt. ....	79
Abbildung 53: Sehaufgabe mit variablem Kontrast.....	79
Abbildung 54: Blockschaltbild Freiversuchstand.....	80
Abbildung 55: HUD Vermessung. ....	81
Abbildung 56: Auswertung der Leuchtdichtemessung für den Codevalue 240. ....	81
Abbildung 57: Messungen der Leuchtdichtedifferenz der Sehaufgabe.....	82
Abbildung 58: Bestimmung des Blendwinkels $\Theta$ . ....	84
Abbildung 59: Hardwareintegration in das Probandenfahrzeug.....	85
Abbildung 60: Flussdiagramm Programm physiologische Blendung.....	86
Abbildung 61: Schematischer Aufbau der Versuchsstrecke.....	87
Abbildung 62: Blendeinfluss in Abhängigkeit vom dargebotenen Grauwert der Sehaufgabe.....	88
Abbildung 63: Vergleich der Sehleistung bei Abblendlicht und Fernlicht für eine Testperson.....	88
Abbildung 64: Entwicklung der Reaktionszeit (Beispiel) bis zum Beginn des Gebens der Antwort für eine Fahrt mit konstantem Kontrast und unter Blendung durch Fernlicht.....	89
Abbildung 65: Exemplarische Untersuchungsergebnisse zur psychologischen Blendung in Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand für eine einzelne Testperson. ....	91
Abbildung 66: Entwicklung der Lösungsentfernung über dem dargebotenen Kontrast der Sehaufgabe .....	92
Abbildung 67: Entwicklung der Lösungsentfernung über dem dargebotenen Weber-Kontrast .....	93
Abbildung 68: Absolute Häufigkeit der Nennung der Bewertungsstufe „gerade akzeptabel“ über dem Begegnungsabstand und deren Median.....	94
Abbildung 69: „Border between Comfort and Discomfort“ in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand .....	95
Abbildung 70: Entwicklung der Reaktionszeit über der Aufgabenanzahl .....	96

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Jahresfahrleistung nach Straßenart in Mrd. km [20].....	9
Tabelle 2:	Unfallwahrscheinlichkeit bezogen auf die geschätzten Fahrzeugbetriebsstunden nach Ortslage .....	9
Tabelle 3:	Übersicht über die errechneten Erkennungsentfernungen in Abhängigkeit von Blendung und Beleuchtungszustand des Unfallfahrzeugs.....	17
Tabelle 4:	Vorgeschriebene vertikale Lage der HGD (in ° unter H-H) .....	23
Tabelle 5:	Häufigkeit der beiden Fehlertypen pro Stunde .....	36
Tabelle 6:	Häufigkeit der beiden Fehlertypen pro Stunde ohne Fehlerzustände unter 2 s.....	36
Tabelle 7:	Parameter $\lambda$ der Verteilungen für die Auswertung nach Strecke bzw. Fehlerdauer .....	37
Tabelle 8:	Sichtweitevorteile durch GLW nach Böhm .....	41
Tabelle 9:	Ergebnisse des Tests der gemessenen Detektionsentfernungen auf Normalverteilung mit den verschiedenen Testsystemen bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ .....	44
Tabelle 10:	Mittelwerte und Streuungen der Detektionsentfernungen für alle verwendeten Systeme an den verschiedenen Sichtzielen.....	45
Tabelle 11:	Ergebnisse des Tests der gemessenen Detektionsentfernungen auf Normalverteilung mit den verschiedenen Testsystemen bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ .....	45
Tabelle 12:	Übersicht über die gegebenen Antworten in der Probandenbefragung.....	50
Tabelle 13:	Ergebnisse der Befragung als Rangfolge (3 ist Höchstpunktzahl) .....	51
Tabelle 14:	Rangsummen und $1,96 \cdot \sigma$ -Quantile für die Analyse nach Schwellenleuchtdichtedifferenz.....	70
Tabelle 15:	Rangsummen und $1,96 \cdot \sigma$ -Quantile für die Analyse nach Weberkontrast.....	70
Tabelle 16:	Rangsummen und $2,58 \cdot \sigma$ -Quantile.....	72
Tabelle 17:	Psychologische Blendfaktoren verschiedener Lichtquellen.....	72
Tabelle 18:	invertierte de Boer – Skala.....	90
Tabelle 19:	Regressionskoeffizienten zu psychologischen Blendbewertung aller Testpersonen sowie Mittelwerte und Konfidenzintervalle .....	114
Tabelle 20:	Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Abblendlicht .....	115
Tabelle 21:	Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Fernlicht .....	115
Tabelle 22:	Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Abblendlicht, mit Blendung .....	116
Tabelle 23:	Sichtbarkeitsentfernung bei Nutzung des Fernlichtes und Blendung .....	116

---

Tabelle 24: Koeffizienten und deren Konfidenzintervalle inkl. individueller Rangfolge für den Schwellenleuchtdichteunterschied.....	117
Tabelle 25: Koeffizienten und deren Konfidenzintervalle inkl. individueller Rangfolge für den Weberkontrast .....	118



---

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden entwicklungsbegleitende Untersuchungen zu adaptiven Fernlichtsystemen durchgeführt. Neben der Analyse der einschlägigen Gesetze, Verordnungen und Regelungen werden dabei Untersuchungen zu physiologischen und psychologischen Fragestellungen bearbeitet und mögliche Risiken und Potentiale für die Verkehrssicherheit analysiert.

Diese Arbeit fasst die einschlägigen internationalen Regelungen und Gesetze, die auf ein permanentes, adaptives Fernlichtsystem anwendbar sind, in einer Recherche zusammen. Gleichzeitig werden die Inhalte von Besprechungen mit verschiedenen Verwaltungs- und Regierungsstellen beschrieben, um deren Interpretation des bestehenden Regelwerkes darzulegen.

Um aufzuzeigen, wie sich verbesserte Beleuchtungssysteme auf die Verkehrssicherheit auswirken können, wird eine umfassende Analyse der Verkehrsstatistiken der deutschen wie auch internationalen Quellen angefertigt. In Verbindung mit einschlägigen Studien zu Unfallursachen und der Rolle von Dunkelheit im Straßenverkehr ergibt sich, dass ein großer Teil von Unfällen mit unbeleuchteten Hindernissen, Wild und Fußgängern zu verhindern wäre, wenn Fernlicht häufiger genutzt würde. Als konkretes Beispiel dient ein selbst angefertigtes Gutachten zu einem nächtlichen Unfall mit einem Fußgänger, der mit Fernlichtnutzung mit großer Wahrscheinlichkeit nicht passiert wäre.

Die Potenziale der Systeme gegenüber der menschlichen Fernlichtnutzung werden erforscht, indem ein Probandentest im fließenden Verkehr durchgeführt wird. Die menschliche Fehlerrate, Reaktionsgeschwindigkeit und die Risikokompensationsstrategien werden analysiert und detailliert beschrieben. Es zeigt sich, dass die Probanden das Fernlicht nur in etwa 50 % aller möglichen Fälle einsetzen. Dies bedeutet, dass schon gut funktionierende Fernlichtassistenten (automatische Fernlichtschaltung) die Nutzungsdauer auf ca. 60 % Fahrzeit auf Landstraßen erhöhen könnten. Weitere Studien legen nahe, dass adaptive Systeme diese Nutzungsdauer auf bis zu 90 % ausweiten können. Damit würde die mittlere zur Verfügung stehende Leuchtweite deutlich erhöht, was der Verkehrssicherheit zugutekäme.

Da eine größere Leuchtweite jedoch nur dann zum Vorteil gereicht, wenn diese auch in eine höhere Detektionsweite mündet, wird ein großer Probandentest durchgeführt. Drei Fernlichtsysteme werden dabei daraufhin getestet, ob die eine frühere Erkennung von Dummies ermöglichen. Das Ergebnis legt einen Detektionsweitenvorteil von etwa 14-18 m gegenüber manuell bedientem Fahrlicht nahe.

Die Einstellung möglicher Nutzer gegenüber den Systemen wird ebenfalls mit einem schriftlichen Akzeptanztest abgeschätzt, da ein System, welches aufgrund unkomfortabler Einstellung nicht genutzt wird, keinen Vorteil bringt. Die Probanden des Fahrtests bewerteten die drei Systeme nach der jeweiligen Fahrt hinsichtlich Komfort, Sicherheitsgewinn, Erlebbarkeit und Kaufanreiz.

Die Blendeigenschaften von Xenon-Scheinwerfern in Abhängigkeit von Blendbeleuchtungsstärke und Abstand der Fahrzeuge im statischen Versuch werden beschrieben. Auch die Abhängigkeit von verschiedenen Lichtfarben wird ermittelt und die Ergebnisse im Kontext mit anderen Studien kommentiert. Für Entfernungen von bis zu 400 m erweisen sich die Annahmen von Holladay, Schmidt-Clausen und der CIE über den Zusammenhang zwischen Blendbeleuchtungsstärke, Blendwinkel und physiologischer Beeinträchtigung als brauchbar. Bei größeren Entfernungen sind diese Thesen allerdings nicht mehr übertragbar, wie in der Arbeit dargelegt wird.

---

Um die Ergebnisse der statischen Tests validieren zu können, werden ebenfalls physiologische Blendungsmessungen während der Fahrt durchgeführt. Ein solcher Test ist bisher noch nicht konzipiert worden. Die Ergebnisse bestätigen die Resultate aus den statischen Tests, die eine graduelle Entblendung des Gegenverkehrs ab 400 m Begegnungsabstand nahelegen.

---

# 1 Einleitung

Die Entwicklung der Kraftfahrzeug-Scheinwerfer war in der Vergangenheit hauptsächlich durch die stetige Verbesserung der Lichtquellen geprägt. Von den Petroleum-Lampen über die erste elektrische Beleuchtung, die Halogenglühlampe in verschiedenen, immer weiter verbesserten, Bauformen hin zur Gasentladungslampe (engl.: High Intensity Discharge Lamp, Abk.: HID) brauchte es gut 100 Jahre Entwicklungszeit. Dabei verbesserten die Ingenieure vor allem die Lichtausbeute (Lichtstrom bezogen auf die eingesetzte Energie) und damit den Lichtstrom auf der Straße. Die Lichtverteilung blieb jedoch unverändert vorgeschrieben, weder im europäischen Raum noch in den USA oder Japan war eine adaptive Lichtverteilung vorgesehen, mit der man die Ausleuchtung des Verkehrsraumes der jeweiligen Situation angemessen gestalten konnte.

## 1.1 Technische Entwicklung von Scheinwerfersystemen

Erst Anfang der neunziger Jahre wurde an Möglichkeiten geforscht, adaptive Lichtverteilungen zu erzeugen, welche schließlich mit der Novellierung der Regelung R 48 der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE oder kurz: ECE) rechtlich zugelassen wurden. Mit der Möglichkeit, das Abblendlicht mit dem Verlauf der Straße zu schwenken (dynamisches Kurvenlicht) war der erste Schritt hin zu einem flexiblen Fahrlicht getan. Das „Adaptive Front-Lighting System“ welches im Jahr 2007 mit Inkrafttreten der neu definierten Regelung ECE 123 legitimiert wurde [1], erweiterte die Möglichkeiten dahingehend, dass die Lichtverteilung nun nicht nur dem Straßenverlauf sondern auch der Geschwindigkeit und dem Straßentyp angepasst werden konnte.

Aber auch dieses Regelwerk definiert nur feste, wenn auch schwenkbare, Lichtverteilungen für verschiedene Straßentypen und Verkehrssituationen, die abhängig von Wetter, Fahrzeugdynamik und weiteren Informationen (Fahrtrichtungsanzeiger, GPS-System etc.) aktiviert werden können. Gemeinsames Ziel aller Bemühungen um flexiblere Beleuchtungssysteme ist die Maximierung der Detektionsweite von unbeleuchteten Hindernissen. Anders formuliert bedeutet dies, dass die effektive Leuchtweite der Scheinwerfersysteme unter nächtlichen Bedingungen bei gleichzeitiger Minimierung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer erhöht werden soll. Diese beiden Ziele sind ohne Informationen über den Standort und die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer jedoch schwer miteinander vereinbar.

Die Wahrnehmung des Menschen während des Autofahrens bei Nacht ist zum einen durch das Licht der eigenen Scheinwerfer begrenzt, zum anderen durch die durch den Gegenverkehr erzeugte Blendung.

Mit der Verfügbarkeit günstiger CMOS-Kameras und größerer Rechenkapazitäten im Fahrzeug wird nunmehr auch die Analyse von Kamerabildern zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer im Vorfeld des Fahrzeugs und damit eine weitaus flexiblere Steuerung der Lichtverteilung möglich. Bereits jetzt sind Fernlichtassistenten auf dem Markt, die das Steuern des Fernlichtes für den Fahrer übernehmen. Erklärtes Ziel ist es allerdings, dem Fahrer überall dort Licht zu bieten, wo es keinen anderen Verkehrsteilnehmer stört. Auf lange Sicht ist es also nicht zielführend, die strenge Trennung zwischen Fern- und Abblendlicht beizubehalten.



---

Anstelle dessen sollten Lichtverteilungen angeboten werden, die ein Fahren mit permanentem Fernlicht ermöglichen und die Lichtverteilung selbsttätig auf Gegenverkehr oder Vorausfahrende Fahrzeuge anpassen. Ein technologisch vergleichsweise einfach zu realisierendes System ist das Anpassen der Hell-Dunkel-Grenze (Abk.: HDG, engl. cut-off line) an die Position anderer Verkehrsteilnehmer. Für ein solches System wird in dieser Arbeit der Begriff „Gleitende Leuchtweite (GLW)“ verwendet.

Mit komplexeren Systemen können aber auch noch flexiblere Lichtverteilungen generiert werden. Beispielsweise sind „vertikale Hell-Dunkel-Grenzen“ zur Ausleuchtung der Fahrbahn­ränder möglich. LED-Matrix-Systeme könnten eine in Sektoren unterteilte Lichtverteilung generieren und das gezielte Abschalten oder Dimmen bestimmter Bereiche ohne komplexe und damit störanfällige Mechanik erlauben.

Im Folgenden werden die adaptiven Fernlichtsysteme allgemein kurz mit dem Begriff „System“ bezeichnet.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

Diese Arbeit analysiert die erreichbaren Verbesserungen für den Fahrer mit einem adaptiven Fernlichtsystem. Gleichzeitig werden die physiologischen Aspekte, wie Blendung und Readaptationszeiten, unter für ein solches System praxisrelevanten Bedingungen getestet.

Dabei wird in Kapitel 2 zunächst auf die Faktoren eingegangen, die die Entwicklung der adaptiven Systeme treibt. Zum einen ist hier die gebotene Ausschöpfung aller technischen Möglichkeiten zur Unfallvermeidung zu nennen. Im Kapitel zur Motivation werden die deutschen aber auch internationalen Unfallstatistiken dahingehend analysiert, wie groß das Potenzial verbesserter nächtlicher Sichtbedingungen zur Unfallverhütung tatsächlich ist. Die Statistiken werden dabei mit weitergehenden Untersuchungen verglichen, um die sichtbedingten Einflüsse, die zu Unfällen führen, klar von weiteren Aspekten wie Alkohol oder Müdigkeit abgrenzen zu können.

Anhand eines selbst untersuchten Unfallherganges wird die große Bedeutung der Verbesserung der nächtlichen Sichtverhältnisse aufgezeigt. Es wird klar dargelegt, dass für den ausgewerteten Hergang die Verwendung des Fernlichtes einen sehr großen Einfluss auf die Vermeidungswahrscheinlichkeit gehabt hätte.

Des Weiteren wird in dem Kapitel die gesetzliche Zulässigkeit adaptiver Systeme analysiert. Es wird aufgezeigt, dass die adaptiven Systeme derzeit unzureichend definiert sind. Dies gilt insbesondere für die Beschreibung von deren gewünschter Funktionsweise, denn bisher gibt es keine zuverlässigen Quellen für geeignete Kriterien.

Um die potentielle Wirksamkeit von automatischen Fernlichtsystemen überprüfen zu können, wird in Kapitel 3 die Nutzung des Fernlichtes durch den Menschen überprüft. Es soll die Frage beantwortet werden, wie oft das Fernlicht eingesetzt wird und ob ein hohes Potential über die tatsächliche Nutzung hinaus besteht, das durch eine automatische Steuerung aktiviert werden könnte. Des Weiteren wird darauf eingegangen wie häufig Autofahrer das Abblenden vergessen, wenn andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden könnten.

Im Kapitel 4 wird mittels eines Probandenversuches untersucht, wie groß der Gewinn an Detektionsweite bei Nutzung von adaptiven Systemen gegenüber manueller Fernlichtschaltung tatsächlich ist. Die Detektionsweite ist die Entfernung, ab der Testfahrer die am Straßenrand platzierten Sichtziele (Dummies) wahrnehmen. Darüber hinaus wird über eine Befragung der

---

Testteilnehmer ermittelt, wie die subjektive Wahrnehmung der Funktionsweise der einzelnen Systeme ausgeprägt ist.

Nachdem die positiven Aspekte der Systeme für den Fahrer eingehend beleuchtet sind, stellt sich die Frage nach eventuellen negativen Wirkungen für den entgegenkommenden Verkehr. Da neuartige Systeme in der Zukunft mit LEDs betrieben werden, könnte es zu höherer Blendung durch unterschiedliche Strahlungsspektren kommen. Das Blendverhalten im Straßenverkehr wird durch statische Versuche in Kapitel 5 unter statischen Bedingungen untersucht. Aus diesen Versuchen können Empfehlungen für die Lichtstärken hergeleitet werden, die anderen Verkehrsteilnehmern in Abhängigkeit von der Entfernung vom eigenen Fahrzeug zugemutet werden können.

Unter dynamischen Bedingungen wird schließlich im Kapitel 6 der Blendeinfluss des Fernlichtes gegenüber dem Abblendlicht gemessen. Aus den Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse auf die Entfernung ziehen, bei der die Systeme andere Verkehrsteilnehmer auf jeden Fall zuverlässig erkennen und entblenden sollten.

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und Anregungen für zukünftige Forschungen über die Wirksamkeit von lichttechnischen Fahrerassistenzsystemen gegeben.

---

## 2 Motivation

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Gründe für die Einführung neuer Fahrerassistenzsysteme sprechen. Dabei wird unter Nutzung von Verkehrsstatistiken verschiedener Länder herausgearbeitet, dass besonders Unfälle mit unbeleuchteten Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen sowie Wild durch bessere Abblendlichtsysteme oder Nutzung eine häufigere Nutzung von Fernlicht verhindert werden könnten. Ebenso wird an einem konkreten, selbst begutachteten Unfallbeispiel gezeigt, wie groß der Vorteil von (Teil-)Fernlicht im Zweifelsfall sein kann.

Desweiteren werden die rechtlichen Aspekte einer Einführung von adaptiven Fernlichtsystemen beleuchtet. Dabei wird gezeigt, dass unter den heutigen Bedingungen eine Zulassung von automatischen Fernlichtregelungen zulässig sein kann.

Abschließend wird eine Übersicht über die Funktionsweise von bereits im Markt befindlichen oder in der Entwicklung stehenden Systemen gegeben.

### 2.1 Charakteristik von Verkehrsunfällen

Die Anzahl der jährlichen Unfälle auf europäischen Straßen mit tödlichen Folgen oder Schwerverletzten ist seit fast vier Jahrzehnten stetig fallend. Wurde noch im Jahr 1970 für Deutschlands Straßen ein historischer Höchststand mit 21.332 Verkehrstoten und 599.364 Verunglückte ermittelt, so sanken diese Zahlen seitdem stetig, mit Ausnahme einer kurzen Zeit nach der Wiedervereinigung, bis auf 4.152 Tote und 397.671 Verletzte im Jahr 2009. Diese Entwicklung ist umso erstaunlicher, als der Fahrzeugbestand in Deutschland im selben Zeitraum um 149 % von 20,8 Mio. auf 51,8 Mio. stieg [2].

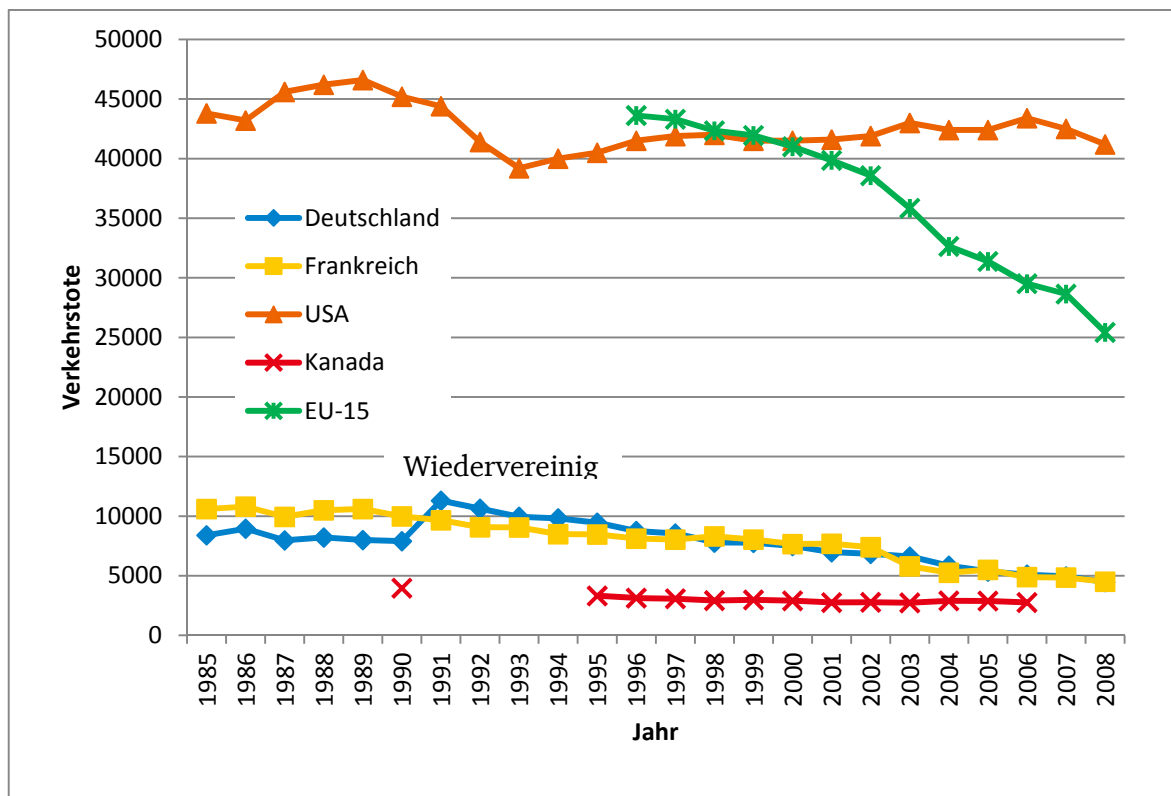
#### 2.1.1 Länderspezifische Unterschiede bei Verkehrsunfällen

Da nicht aus allen Ländern detaillierte Unfallstatistiken vorliegen, beschränken sich die Recherchen auf Deutschland, Frankreich und die EU. Einzelne Vergleiche mit den USA anhand von Sekundärliteratur stellen die Lage in Relation zu Anstrengungen in anderen Industrienationen.

Dass diese Entwicklung auch in den westlichen Industrienationen nicht selbstverständlich ist, zeigen beispielsweise die von den Vereinigten Staaten veröffentlichten Zahlen. Jenseits des Atlantiks lag die Zahl der Verkehrstoten seit 1993 in jedem Jahr zwischen 40.000 bis 42.000 Toten pro Jahr, wobei die Tendenz bis 2005 steigend war. Erst für das Jahr 2008 gibt es zum zweiten Mal seit 1963 weniger als 40 Tausend Tote [3]. In Canada, bezüglich der verkauften Pkw-Typen und hinsichtlich der Straßengeometrie mit den USA vergleichbar, ist im Zeitraum von 1993 bis 2006 ein Rückgang von 3615 auf 2889 Tote pro Jahr zu verzeichnen (-20,8 %) [4]. Ein umfassendes Bild zeichnet die niederländische Stiftung „Institute for Road Safety Research (SWOV)“, die die Kennzahlen von 23 OECD-Staaten veröffentlichte, von denen ein vollständiger verkehrsstatischer und demographischer Datensatz vorliegt [5].

Die Studie belegt einen höchst positiven Trend innerhalb der Staaten der Europäischen Union. Dennoch ist das Hauptziel eines White Papers der Europäischen Kommission zur Verkehrspolitik aus dem Jahr 2001 [6], die jährliche Zahl der Verkehrstoten von 2001 bis 2010 um die Hälfte zu reduzieren verfehlt worden, auch wenn die Kommission in einer Zwischenbilanz 2006 noch an diesem

Ziel festhielt [7]. Letztendlich wurde die Anzahl an Toten um 43 % verringert. Auch Deutschland hat dieses Ziel sehr knapp verfehlt (-48 %), was auch auf die verstärkten Anstrengungen in der Vergangenheit zurück zu führen ist, die bereits zu einer der europaweit niedrigsten Todesfallraten geführt haben, obwohl die Unfallrate in etwa konstant blieb [8, 9]. Im Gegensatz dazu ist in den USA ein Trend zu sinkendem Unfallrisiko bei gleichbleibend hohen Todesfallraten zu verzeichnen, die erst ab 2007 wieder gesunken sind [10].



**Abbildung 1:** Vergleich der Entwicklung der Anzahl bei Verkehrsunfällen Getöteter in verschiedenen Ländern und Weltregionen.

Im Zusammenhang mit dieser Entwicklung wird in umfang- und zahlreichen Veröffentlichungen auf die ständig steigende Anzahl und Wirksamkeit von aktiven und passiven Sicherheitssystemen im Automobil und Kraftrad (s. etwa [11], [12]) hingewiesen. Eine gewichtige Rolle dürften jedoch auch die zunehmend restriktive Verkehrsgesetzgebung und Sensibilisierung der Bevölkerung für die Gefahren des Straßenverkehrs spielen, wie z.B. Kampagnen zur Gurtnutzung 1984 („Gurt Klick – Immer“), zur Helmtragepflicht (1980) oder zu Alkohol am Steuer („Don’t Drink and Drive“). Dies muss angesichts der unterschiedlichen Entwicklung der Unfallzahlen in den USA und Kanada zumindest als sehr wahrscheinlich gelten.

Dass verschärfte Maßnahmen und Sanktionen hinsichtlich Alkohol und unangepasster Geschwindigkeit direkt zu Rückgängen in Unfall- und Todesraten führen können, zeigt das Beispiel Frankreich. Dort werden seit dem Jahr 2000 sukzessiv verstärkte Alkohol-, Drogen- und Geschwindigkeitskontrollen durchgeführt und höhere Strafen verhängt [13], was sich bis 2008 nahezu in einer Halbierung der jährlichen Verkehrstoten niederschlug (-44,35 %), allerdings ausgehend von einem im Vergleich zu Deutschland extrem hohen Basiswert (von 7684 Toten in 2002 auf 4443 in 2008) [14]. Erst als der damalige Präsident Jaques Chirac der Verkehrssicherheit oberste Priorität einräumte und

---

einschneidende Maßnahmen durchsetzte, sank die Zahl der Verkehrstoten im selben Jahr um über 20 % und im Jahr darauf nochmal um 16,8 %.

### **2.1.2 Potentiale von adaptiven Fernlichtsystemen zur Reduktion des Unfallrisikos**

Wie vorangehend beschrieben, ist das Unfallrisiko durch viele Faktoren, auch solche, die nicht im Einwirkungsbereich des Fahrers oder dessen Fahrzeuges liegt, beeinflusst.

Um das Potential zur Reduktion von Unfallzahlen durch eine verbesserte Beleuchtung und insbesondere durch adaptive Fernlichtsysteme zu identifizieren, müssen die amtlichen Analysen tiefergehend studiert werden. Insbesondere ist von Bedeutung, wann und wo sich die Unfälle ereignen. Da lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme nicht erst in gefährvollen Situationen in die Fahrzeugdynamik eingreifen, sondern den Fahrer durch Unterstützung seiner Wahrnehmung bei seiner primären Fahraufgabe helfen sollen, ist die Gesamtheit der Unfälle dahingehend zu untersuchen, welche Ereignisse durch eine verbesserte Sicht verhindert werden könnten.

Zunächst ist also zu erfassen, in welchen Situationen eine optimierte Ausleuchtung der Fahrbahn die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls reduzieren kann. Wie schon eingangs ausgeführt, ist die Benutzung von Fernlicht auf ausreichend und durchgehend beleuchteten Straßen nicht erlaubt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Unfälle innerhalb geschlossener Ortschaften durch automatische Fernlichtsysteme nicht zu reduzieren wären, da diese deaktiviert blieben. Neben den Ortschaften ist auch das Potential auf Autobahnen eher gering. Zum einen ist die Verkehrsdichte hier in der Regel auch in den Dunkelstunden sehr hoch, weshalb adaptive Fernlichtsysteme wenig Zusatznutzen bringen. Zum anderen sind auf Autobahnen vergleichsweise wenig unbeleuchtete Verkehrsteilnehmer, Wild oder Hindernisse zu erwarten.

Unfälle mit Hindernissen mit selbstleuchtenden Markierungen (Rückleuchten, Scheinwerfer, Baustellenausrüstungen) sind eher nicht auf das physiologisch bedingte Übersehen zurückzuführen, sondern auf Ablenkungen, unangepasste Fahrweise oder wetterbedingt schlechte Sicht. Für den letztgenannten Fall ist ein gut sichtbares, angepasstes, rückwärtiges Signalbild anderer Verkehrsteilnehmer wichtiger, wie es derzeit in der Automobilindustrie zur Marktreife gebracht wird [15]. Die ersten beiden Fälle werden durch aktive Systeme wie elektronische Stabilitätsprogramme (ESP), adaptive Abstandsregelung (ACC), Fahrspurhalteassistenten oder Ausweichassistenten (etwa PRORETA [16]) vermieden. Der größte Nutzen adaptiver Fernlichtsysteme ist aus den genannten Gründen vor allem bei der Reduktion von Unfällen mit Fußgängern, Wild und anderen unbeleuchteten Hindernissen auf Landstraßen zu vermuten.

### **2.1.3 Lage der Unfallorte**

Die Eigenschaften der Orte, an denen sich Unfälle bevorzugt ereignen, sind für die Beurteilung technischer Gegenmaßnahmen von großer Wichtigkeit. Für die Bundesrepublik Deutschland (BRD) geben das statistische Jahrbuch und die Fachpublikation über die Entwicklung des Unfallgeschehens einen ersten Einblick in die Charakteristik der Verkehrsunfälle [17, 18]. Es ist ersichtlich, dass die große Mehrheit der Unfälle mit Personenschaden innerorts passiert (vgl. Abbildung 2). Die Zahlen werden auch für andere europäische Staaten bestätigt, beispielsweise für das Vereinigte Königreich [19].

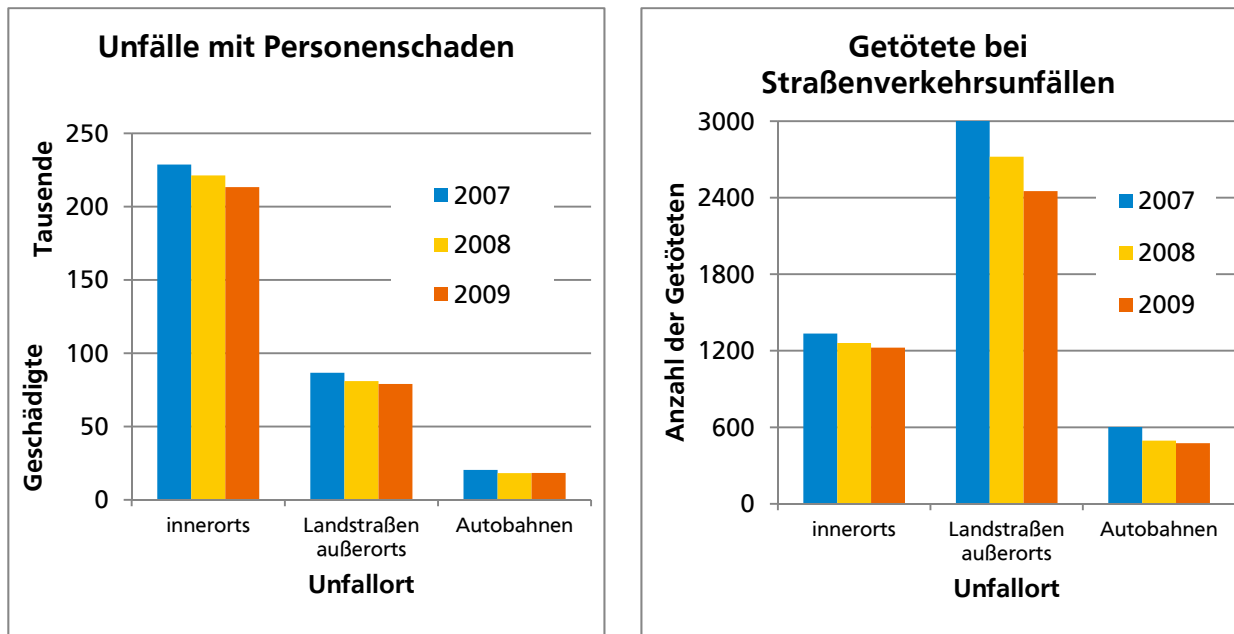


Abbildung 2: Örtliche Verteilung der Unfälle mit Verletzten oder Getöteten [18]

Obwohl die absolute Anzahl der Verletzten bei Unfällen innerhalb von Ortschaften am höchsten ist, ist der Anteil der Getöteten auf Landstraßen signifikant höher als in Ortschaften oder auf Autobahnen (s. Abbildung 2, rechts).

Tabelle 1: Jahresfahrleistung nach Straßenart in Mrd. km [20]

Bundesautobahnen	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen
213,3	107,93	81,6	46,3

Auch das fahrleistungsbezogene Risiko, außerorts im Straßenverkehr verletzt zu werden, ist auf Landstraßen gegenüber Autobahnen deutlich erhöht. Die Ergebnisse der letzten bundesweiten manuellen Verkehrszählung 2005 [20] zeigen, dass das Verhältnis der auf Bundesautobahnen und der auf anderen außerörtlichen Straßen gefahrenen Kilometer bei etwa 1:1,11 liegt (vgl. Tabelle 1). REICHART errechnet ein expositionsdauerbezogenes Risiko für einen Unfall mit Personenschaden, indem die Fahrdauer anstelle der Fahrleistung als Kriterium herangezogen wird. Auch hier erweist sich der außerörtliche Verkehr (ohne Autobahnen) als am gefährlichsten [21].

Tabelle 2: Unfallwahrscheinlichkeit bezogen auf die geschätzten Fahrzeugbetriebsstunden nach Ortslage

Ortslage	Mittl. Exposition (Fzg.-stunde)	Wahrscheinlichkeit für Unfall mit Pers.-schaden (Unfälle / Fzg.-stunde)
innerorts	$6,3 \cdot 10^9$	$p = 3,9 \cdot 10^{-5}$
außerorts	$2,8 \cdot 10^9$	$p = 5,1 \cdot 10^{-5}$
Autobahnen	$1,4 \cdot 10^9$	$p = 1,9 \cdot 10^{-5}$

Der deutliche Unterschied in den Unfallzahlen kann also nicht allein aus der Fahrleistung begründet werden. Vielmehr dürften auf Landstraßen der nicht abgetrennte Gegenverkehr (in Österreich sind 9% der tödlichen Verkehrsunfälle Frontalzusammenstöße [22]) oder auch fehlender Schutz gegen Wildwechsel (in Österreich 3 %) sein. Auch die Straßenführung und der allgemeine Straßenzustand dürften eine wichtige Rolle spielen, wie etwa STEINBRECHER [23] nahelegt.

---

Das Abkommen von der Fahrbahn, in Österreich Ursache für etwa 19% aller tödlichen Unfälle, ist ebenfalls auf Autobahnen unwahrscheinlicher, da diese mit deutlich mehr passiven Leitelementen ausgerüstet sind. Die örtliche Verteilung von schweren Unfällen liefert ein weiteres Indiz dafür, dass das größte Nutzenpotenzial der Fernlichtassistenzsysteme in der Reduktion von schweren Unfällen auf Landstraßen liegt.

Allerdings können nur Unfälle verhindert werden, die auf schlechte Sichtbedingungen durch Dunkelheit zurück zu führen sind. Hierunter fallen auch jene Unfälle, die dadurch entstanden sind, dass der Fahrer nicht innerhalb seiner Detektionsweite anhalten konnte. Daher ist zunächst zu klären, wie groß der Einfluss der Dunkelheit und der Beleuchtung auf die Unfallzahlen ist.

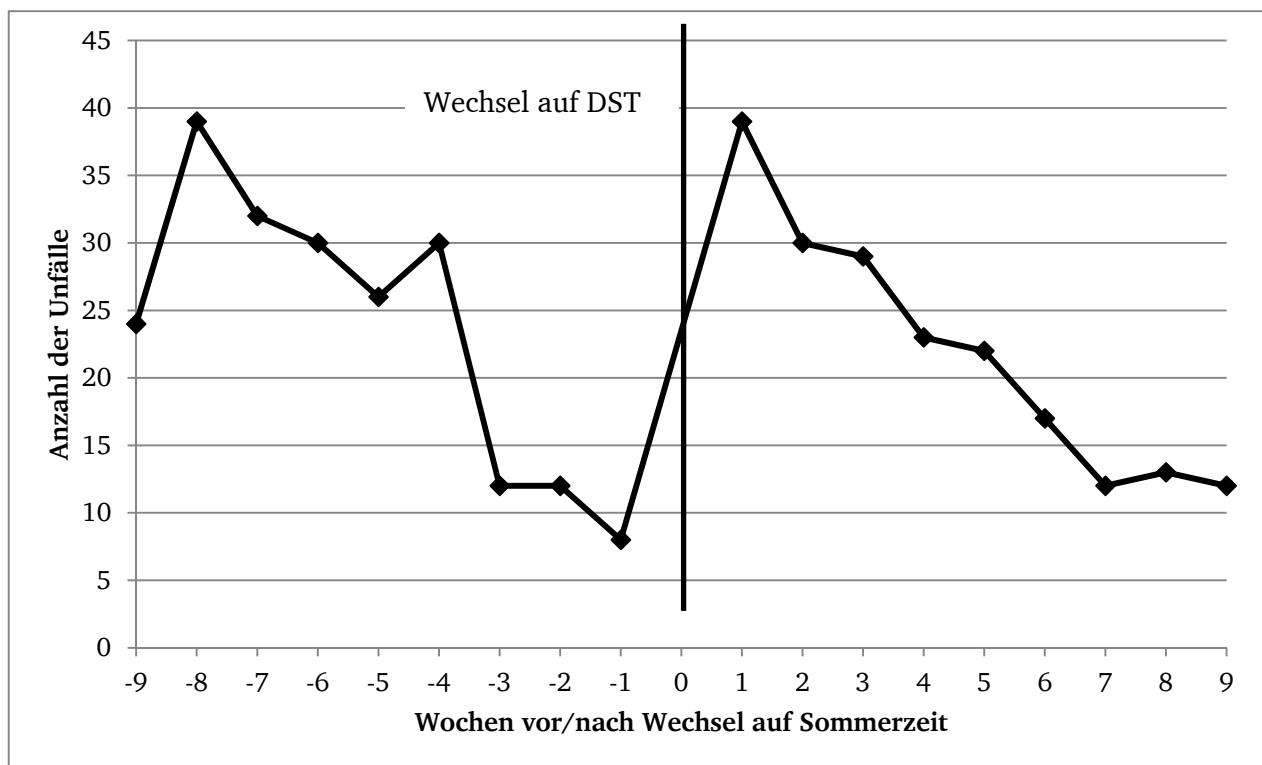
### **2.1.4 Einfluss der Umgebungsleuchtdichte auf die Unfallhäufigkeit**

HUMMEL beschreibt ausführlich, dass nachts die Gefahr von Kollisionen mit unbeleuchteten Verkehrsteilnahmen überproportional ansteigt, während Unfallarten mit beleuchteten Verkehrsteilnehmern, Gegenständen, Wild oder Alleinunfälle in der Anzahl konstant bleiben, oder abnehmen [24]. Er gibt an, dass sich die Anzahl der schweren Fußgängerunfälle um 72,1% Prozent verringern ließe, wenn nachts Tageslichtbedingungen erzeugt werden könnten. Für die Kollisionen mit unbeleuchteten Hindernissen errechnet er einen Wert von 55,5%. Die restlichen Unfälle sind auf andere Einflussfaktoren zurückzuführen, die das Unfallrisiko nachts erhöhen. Die ausgewertete Datenbasis ist die der GIDAS-Studie (German in-Depth Accident Study, [25]).

Ein ähnliches Bild zeichnet SULLIVAN [26]. Um den reinen Einfluss der Umgebungsleuchtdichte auf die Unfallhäufigkeit zu testen, untersuchte er die Anzahl der Unfälle, die sich um die Umstellung zwischen Sommer- (DST) und Winterzeit in den USA ereignen. Dabei stellte er fest, dass Fußgängerunfälle stark von der Umgebungsbeleuchtung abhängen, während Alleinunfälle wie „Abkommen von der Fahrbahn“ fast unabhängig von der Beleuchtungssituation sind. Dies lässt sich damit belegen, dass sich kurz nach der Umstellung auf Sommerzeit eine erheblich höhere Anzahl an Unfällen mit Fußgängern ereignen als vorher. Die einzige Einflussvariable, die sich durch die Umstellung ändert ist jedoch die Umgebungsleuchtdichte, deren Einfluss damit statistisch nachgewiesen ist. Fußgänger in den USA haben demnach ein bis zu siebenmal höheres Risiko, nachts im Straßenverkehr getötet zu werden, als tagsüber. Abbildung 3 zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch. Dabei wird deutlich, dass die Anzahl der wöchentlichen Unfälle mit Zunahme des Beleuchtungsniveaus zu einer bestimmten Uhrzeit abnimmt. Zur selben Uhrzeit nach Umstellung auf DST ist die globale Beleuchtungsstärke niedriger und die Anzahl der Unfälle nimmt signifikant zu. Bei der Umstellung von DST auf Winterzeit ist ein entgegengesetzter Effekt zu beobachten.

Ebenso zeigen Statistiken der Fakultät für Verkehrswissenschaft in Dresden, dass die Unfallhäufigkeit während der Nacht überproportional hoch ist [27].





**Abbildung 3:** Anzahl der tödlichen Fußgängerunfälle pro Woche während der Dämmerungsstunden Verteilung vor und nach der Umstellung auf Sommerzeit (DST) nach Sullivan [26]. Die Darstellung zeigt, dass vor dem Wechsel auf Sommerzeit die Anzahl der Unfälle mit Fußgängern zurückgeht, nach der Umstellung aber sprunghaft ansteigt. Die einzige Variable, die sich durch die Umstellung ändert, ist jedoch die Umgebungsleuchtdichte.

Eine Studie von HARRUFF, die die Charakteristik der Fußgängerunfälle in King County, Washington, USA, untersuchte [28], belegt ebenfalls eine starke Zunahme der tödlichen Fußgängerunfälle in der dunklen Jahreszeit. Dabei ereignen sich rund 13% aller Unfälle im Januar, im Juni sind es hingegen nur 6%.

Da die einschlägige Literatur, wie dargelegt, übereinstimmend davon ausgeht, dass der Hauptnutzen der adaptiven Fernlichtsysteme in der besseren Erkennbarkeit der unbeleuchteten Verkehrsteilnehmer und Hindernisse zu sehen sein wird, geht diese Arbeit in der Folge vor allem auf diese Gruppen ein.

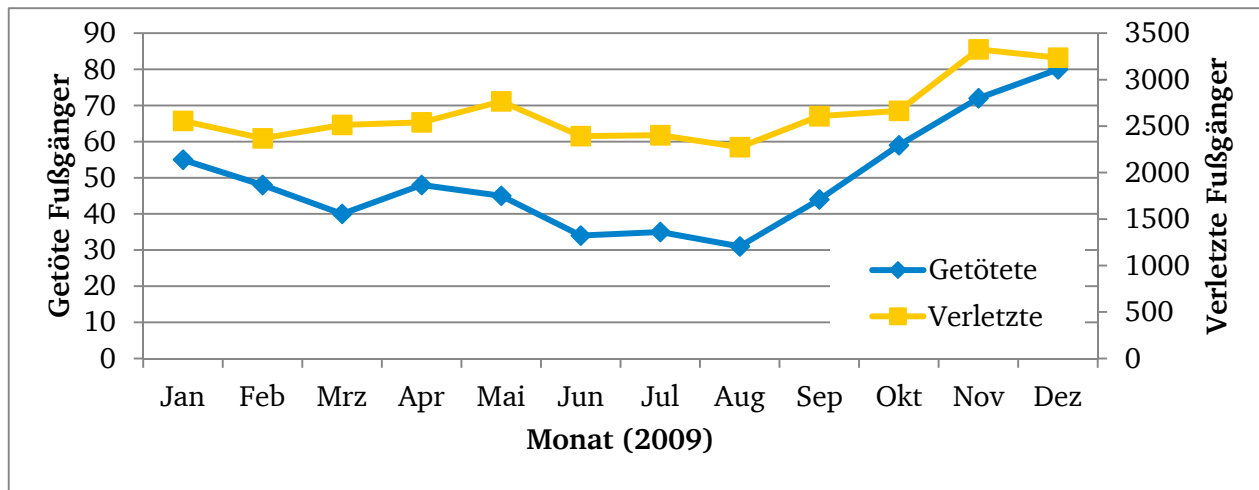
### 2.1.5 Einfluss der Tageszeit und Umgebungsleuchtdichte auf die Unfallschwere

Die Berichte der nationalen Statistikinstitute schlüsseln das Unfallgeschehen nicht in der für eine differenzierte Betrachtung nötigen Tiefe auf. Hierzu sind weitergehende Studien zu analysieren.

Obwohl nur etwa 15% - 20% der Verkehrsleistung in der dunklen Tageszeit stattfindet, sind in diesen 50% der Verkehrstoten zu beklagen. Auch wenn in vielen Fällen Alkohol eine der Unfallursachen ist, gibt es doch eine Vielzahl an Unfällen, die durch unangepasste Fahrweise verursacht werden. Diese bestehen oft aus Fußgängerunfällen und Auffahren auf Objekte [29].

Auch eine Auswertung des statistischen Bundesamtes (s. Abbildung 4) nach den Unfallzahlen in bestimmten Monaten zeigt deutlich, dass die Gefährdung für Fußgänger in den Dunkelmonaten am höchsten ist. Dies gilt übrigens nicht für Fahrrad- und Motorradfahrer. Die Vermutung liegt nahe, dass aufgrund der kühleren und feuchteren Witterung nur die notwendigsten Wege per Zweirad zurückgelegt werden, während die zu Fuß bewältigten Strecken eher zwingend sind.





**Abbildung 4:** Anzahl der verunglückten Fußgänger nach Monaten und Unfallschwere in Deutschland. Die Dunkelmonate haben einen deutlich erhöhten Anteil an Getöteten [18].

Bereits in den neunziger Jahren wurden die Unfallberichte in den USA dahingehend untersucht, wie hoch der Einfluss der Umgebungsleuchtdichte ist. Besonders die Forscher des UMTRI haben auf diesem Gebiet wichtige Erkenntnisse gewonnen. So hat OWENS anhand von statistischen Auswertungen dargelegt, dass Dunkelheit das Risiko für Fußgänger und Fahrradfahrer deutlich erhöht, Opfer eines tödlichen Unfalles mit einem Auto zu werden [30]. Dies gilt auch dann, wenn Unfälle mit anderen Faktoren, wie Trunkenheit am Steuer oder schlechtes Wetter, aus der Analyse ausgeschlossen werden. Das Risiko für Autofahrer erhöht sich hingegen nicht signifikant. Dies gilt allerdings nicht mehr, wenn zur Dunkelheit weitere Faktoren wie schlechtes Wetter hinzu kommen.

HARRUFF gibt in seiner Studie für King County, WA an, dass sich 53% aller tödlichen Fußgänger-Unfälle in den Abendstunden von 17-24 Uhr ereignen [28]. Gründe hierfür sind offensichtlich das physiologisch bedingte Übersehen anderer Verkehrsteilnehmer, wie auch die erhöhte Wahrscheinlichkeit von Fehlhandlungen.

KÜHN hat auf Basis der GIDAS-Daten, die für die Großräume Hannover und Dresden ermittelt werden, errechnet, dass 45% der Fußgängerunfälle bei Tageslicht stattfinden, während 35% bzw. 20% bei Dämmerung oder nachts passieren [31]. Damit decken sich die Angaben für zwei ausgewählte Regionen in Nordamerika und Deutschland.

Das kanadische Verkehrsministerium beschreibt, dass die meisten Fußgänger zwischen 17 und 20 Uhr tödlich verunglücken, während die meisten Unfälle mit Fußgängern schon zwischen 15 und 18 Uhr passieren. Das Risiko einer schweren Verletzung oder eines Todesfalls für Fußgänger ist also an die Tageszeit und somit die Umgebungsleuchtdichte gekoppelt [32]. REICHART geht von einem teilweise dreißigfach höheren Risiko für tödliche Unfälle während der Dunkelstunden aus [21]. Ausschlaggebend könnte hierbei der spätere Zeitpunkt des Erkennens eines Fußgängers durch den Autofahrer sein und der damit einhergehende kürzere zur Verfügung stehende Anhalteweg. Die Verletzungsschwere der Fußgänger nähme durch die höhere Aufprallgeschwindigkeit zu.

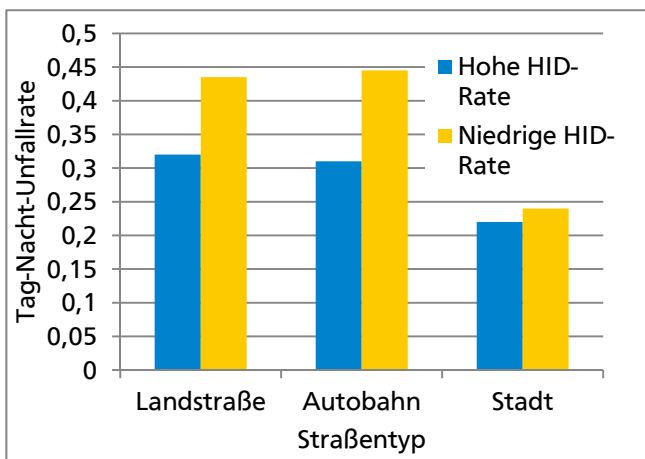
Das erhöhte Risiko für tödliche Unfälle in den Nachtstunden ist den meisten Autofahrern nicht bewusst. Insbesondere das Reduzieren der Geschwindigkeit als Reaktion auf eine durch die Reichweite des Abblendlichtes begrenzte Detektionsweite wird von vielen Autofahrern nicht praktiziert. Dieses Verhalten resultiert aus der subjektiven Gefahrenwahrnehmung. Nach ASANGER wird der Mensch die erhöhte Gefährlichkeit erst dann wahrnehmen, wenn er aus anderen Situationen die objektiv größere

Gefährdung erlernt hat (lernpsychologisches Erklärungsmodell der Gefahrenkognition). Es muss also infolge von Dunkelheit schon einmal eine gefährliche Situation entstanden sein [33].

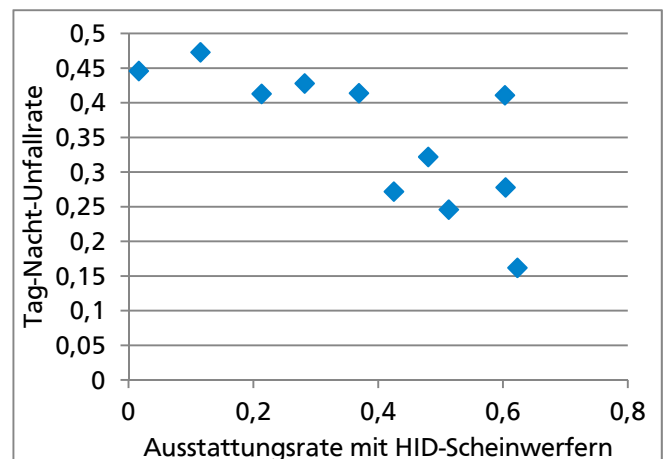
## 2.1.6 Einfluss der Beleuchtungssysteme auf die Unfallzahlen

Ein direkter Einfluss des Beleuchtungssystems auf die Unfallzahlen ist statistisch schwer nachzuweisen. Immerhin gibt das statistische Jahrbuch an, dass bei 0,2% aller Verkehrsunfälle mit Personenschaden auch eine defekte Beleuchtung Einfluss hatte. Diese Unfälle könnten bereits mit nicht adaptiven, aber ausfallsicheren Systemen wie Gasentladungs- oder LED-Scheinwerfern verhindert werden.

SCHÄBE gibt an, dass die Einführung von Xenon-Scheinwerfern einen statistisch nachweisbaren Einfluss auf die Unfallhäufigkeit hatte. Untersucht wurde das Verhältnis der Anzahl von Nacht- und Tagunfällen verschiedener Fahrzeugtypen. Es zeigte sich, dass weniger Nachtunfälle passierten, je höher die Ausstattungsrate der Fahrzeuge mit HID-Scheinwerfern war. Die Methodik dieser Studie basiert darauf, dass im beobachteten Zeitraum alle Faktoren (Bremsentechnologie, Antischlupfregelung etc.) außer der Beleuchtung konstant geblieben sind oder ausgefiltert werden konnten [34, 35].



**Abbildung 5:** Unfallrate in Abhängigkeit von Straßentyp und HID-Rate  
Darstellung des unterschiedlichen Verhältnisses von Tag- und Nachtunfällen bei Fahrzeugen mit hoher Ausstattungsrate mit HID-Scheinwerfern und Fahrzeugen mit geringerer Ausstattungsrate



**Abbildung 6:** Unfallrate in Abhängigkeit von HID-Ausstattungsrate  
Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der Anzahl der Tag- und Nachtunfälle und der Ausstattungsrate eines Fahrzeugtyps mit HID-Scheinwerfern

Des Weiteren kommen Kollisionen mit unbeleuchteten Hindernissen oder Wild hinzu. Für das Jahr 2009 betrugen diese 1,0% (4997) der Unfälle mit Personenschaden [18]. Diese Anzahl könnte zumindest vermindert werden, wenn adaptive Lichtsysteme eine höhere Erkennbarkeitsweite zur Folge hätten. Die folgenden Kapitel werden hierzu Abschätzungen liefern.

Ein hohes Potenzial für eine Verminderung dürfte sich auch bei der Zahl der Fußgängerunfälle ergeben, da auch sie unbeleuchtete Verkehrsteilnehmer darstellen. Im Jahr 2009 wurden 34499 Fußgänger im Straßenverkehr verletzt oder getötet. Während insbesondere Abbiegelicht zu besserer Erkennbarkeit von Fußgängern und Radfahrern in der Stadt führt, dürften automatische Fernlichtsysteme sich deutlicher außerhalb von Ortschaften auswirken. Laut KÜHN ereignet sich die Mehrzahl aller Fußgängerunfälle innerorts (93,7%). Jedoch ist die Verletzungsschwere und Todesfallrate der Fußgängerunfälle außerorts wesentlich höher wie Abbildung 7 verdeutlicht [31]. Die Zahlen beruhen auf Daten der Universität Hannover und sind daher nicht für das gesamte Bundesgebiet repräsentativ.

Insbesondere im ländlichen Raum dürfte der Anteil der außerorts Verunglückten höher ausfallen. Zudem sind dort nachts häufig die Straßenbeleuchtungen deaktiviert, was zu ähnlichen Bedingungen wie auf Landstraßen führt. Diese Vermutung bestätigt sich, wenn man die Zahlen von KÜHN mit der bundesdeutschen Gesamtstatistik vergleicht. Kommen in der Studie von KÜHN etwa 1 % aller verunglückten Fußgänger ums Leben, waren es bundesweit im Jahre 2008 etwa 2,0 %, im Jahre 2010 noch 1,8 % [18].

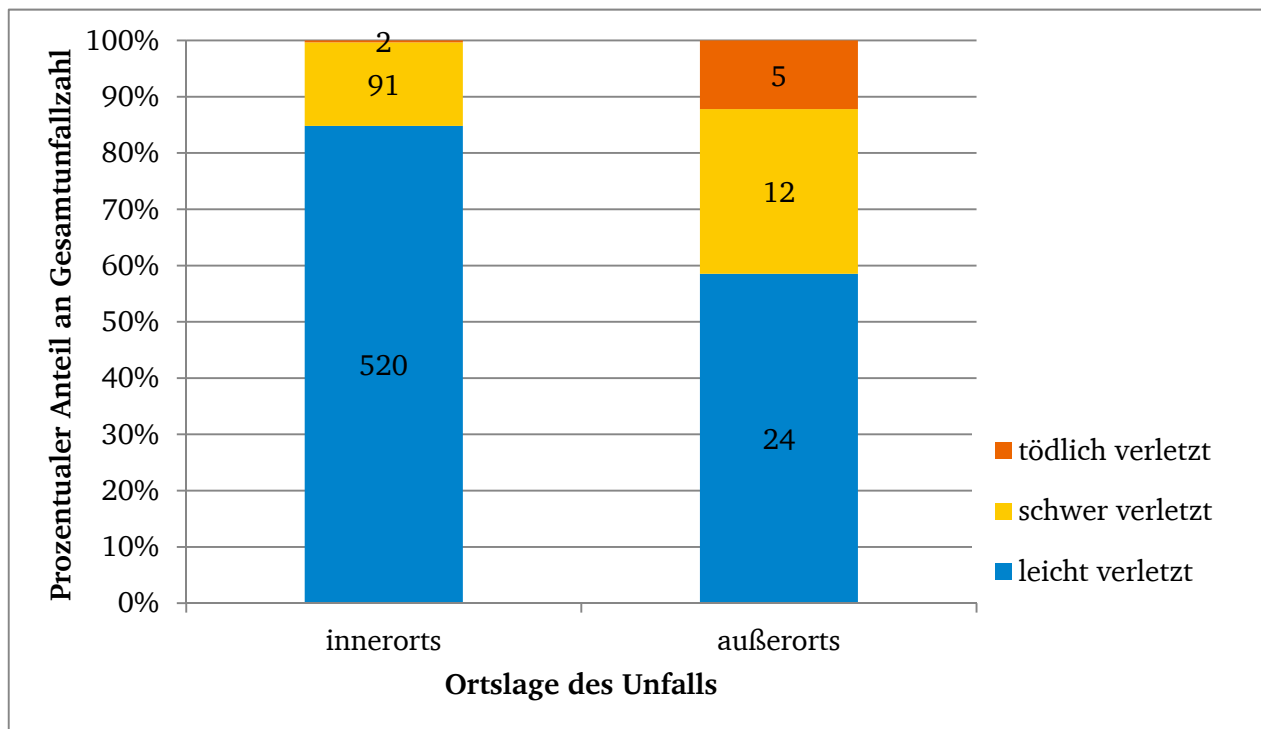


Abbildung 7: Anzahl der Verkehrsunfälle eingeteilt nach Verletzungsschwere [31]

Eine bessere Beleuchtung am Fahrzeug erhöht den Kontrast von Fußgängern zum Hintergrund. Dieser könnte theoretisch auch durch hellere Kleidung der Fußgänger erhöht werden, in den von KÜHN ausgewerteten Daten sind jedoch nur 14% der verunglückten Fußgänger hell gekleidet gewesen. Leider wird keine Aussage darüber gemacht, wie groß deren Anteil an der Gesamtheit der Fußgänger ist. Wird davon ausgegangen, dass diese Verteilung nicht durch Zufall erklärbar ist, so werden adaptive Fernlichtsysteme zu Reduktion von Unfallzahlen führen, da sie die Beleuchtung der Fußgänger erhöhen werden.

## 2.1.7 Zusammenfassung der Daten zur Unfallforschung

Die Entwicklung der Anzahl der Todesopfer im Straßenverkehr ist in den Industriestaaten weltweit rückläufig. Dies gilt trotz der weiter steigenden Jahresfahrleistungen und Fahrzeugzulassungen.

Dennoch gibt es regionale Unterschiede, die ihre Ursachen neben den unterschiedlichen Ausstattungsmerkmalen der Fahrzeuge und Straßen wohl auch in den verkehrspsychologischen Strategien der einzelnen Länder und Weltregionen haben. Aus dem Beispiel Frankreichs kann abgeleitet werden, dass der Einfluss verkehrspolitischer Maßnahmen und vor allem deren Kontrolle einen auch kurzfristig messbaren Einfluss auf die Unfallraten haben.

Auf den vorangegangenen Seiten konnte aufgezeigt werden, dass auch die Umgebungsleuchtdichte und die Beleuchtungssysteme des Fahrzeuges einen Einfluss auf die Unfallhäufigkeit haben. Über die

Hälfte aller Fußgängerunfälle passieren während der Dämmerung oder nachts, obwohl das Verkehrsaufkommen zu diesen Zeiten reduziert ist. Ebenso ist die Verletzungsschwere in den Dunkelstunden erhöht. Die Verletzungsschwere der Unfälle außerorts ist ebenfalls erhöht, was vor allem durch höhere gefahrene Geschwindigkeiten und der dadurch erhöhten Aufprallenergien erklärt werden kann.

Es ist daher davon auszugehen, dass die Einführung der adaptiven Fernlichtsysteme die Unfallzahlen mit unbeleuchteten Verkehrsteilnehmern auf Dauer messbar senken wird. Durch die Erhöhung der Detektionsweite lässt sich eine Vielzahl von Unfällen gänzlich vermeiden. Die Verletzungsschwere dürfte durch die geringeren Aufprallenergien aufgrund eines verlängerten Reaktionszeitraumes ebenfalls zurückgehen. Eine seriöse Quantifizierung des Potenzials ist jedoch allein aus den statistischen Quellen nicht herzuleiten.

## 2.2 Exemplarischer Unfallhergang

Während der Entstehung dieser Arbeit ist Prof. Khanh wiederholt vom Oberlandesgericht München als lichttechnischer Gutachter zur Beurteilung der Hergänge von Verkehrsunfällen hinzugezogen worden. Grundsätzlich stellt sich in vielen Verfahren im Nachgang von Unfällen die Frage, ob ein Fahrer nächtens eine Person oder Hindernis erkennen konnte oder musste.

### 2.2.1 Unfallsituation

Exemplarisch soll an dieser Stelle ein Unfall näher diskutiert werden, an dessen Untersuchung der Autor maßgeblich beteiligt war [36]. Der Unfall ereignete sich am 07.12.2001 auf einer Brücke auf der Bundesstraße B2 nahe der Ortschaft Töpen bei Hof.



**Abbildung 8:** Unfallort mit Versuchsperson und Hund. Der Bereich bietet keinerlei Fußgängerweg und liegt in einer Senke. Die Leitplanken auf beiden Seiten der Brücke verhindern ein Ausweichen eines Fußgängers.

Die Untersuchungen wurden am 06.12.2007 bei ähnlicher Witterung durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Am Untersuchungstag herrschte feuchte Witterung, die Straße war wie am Unfalltag regennass (vgl. Abbildung 8).

Der Untersuchungsauftrag in diesem Fall lautet, die Sichtweite des Kraftfahrers in dieser Situation abzuschätzen. Die allgemein anerkannte Vorgehensweise dazu ist u.a. durch Eckert beschrieben worden [37]. Dabei wird davon ausgegangen, dass nachts die Erkennbarkeit von Objekten vor allem von ihrer Leuchtdichtedifferenz vom Umfeld abhängt, da die Farbwahrnehmung im mesopischen Bereich (Dämmerungssehen) nur eingeschränkt funktioniert.

## 2.2.2 Theoretische Grundlagen

Die minimale Leuchtdichte, um zwei Objekte unterscheiden zu können, wurde von ADRIAN in Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit (Adaptationsleuchtdichte  $L_A$ ) beschrieben [38].

$$\Delta L_S = K \cdot C \cdot \left( \frac{A(L_A)}{\alpha - B(L_A)} \right)^2 \quad \text{Gl. 2-1}$$

- mit  $\Delta L_S$ : Schwellenleuchtdichte in  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$   
 K: Faktor der Wahrnehmungsprobabilität (3,1 für nahezu 100%)  
 C: Praxisfaktor ( $C=10$ ), um Feldbedingungen zu genügen  
 (Unerwartetheit, Eigengeschwindigkeit etc.)  
 A, B: Konstanten nach Blackwell in Abhängigkeit von  $L_A$  [39]  
 $\alpha$ : Größe des Sichtziels in Winkelminuten [']

Im Falle des Fußgängers sind die Größen der einzelnen Gliedmaßen und damit möglichen Sichtziele bekannt. In Verbindung mit dem Abstand eines Beobachters zum Fußgänger kann somit der Sehwinkel  $\alpha$  bestimmt werden.

$$\tan \alpha = \frac{m}{s} \quad \text{Gl. 2-2}$$

- mit  $\alpha$ : Sehwinkel  
 m: Ausdehnung des Sichtziels in m  
 s: Distanz zum Sichtziel in m

Es ist also möglich, für jede Entfernung eine Leuchtdichtedifferenz  $\Delta L_S$  zu berechnen, bei der ein Fußgänger sicher erkannt werden kann. Diese Leuchtdichtedifferenz muss kleiner sein als die in der tatsächlichen Szene gemessenen, vorhandenen Differenzen  $\Delta L_{\text{Vorh}}$ . Wenn dies zutrifft, dann muss ein Autofahrer in der Lage sein, den Fußgänger wahrzunehmen und ein Brems- oder Ausweichmanöver einzuleiten.

### 2.2.3 Durchführung der Begutachtung

Um beurteilen zu können, ob ein Fußgänger oder Hindernis für einen Fahrer im Verkehr sichtbar sein muss, werden für unterschiedliche Entfernungen Leuchtdichteaufnahmen aus Fahrersicht gemacht (Beispiel Abbildung 8). Aus den Bildern können dann die Größen vorhandener Leuchtdichteunterschied  $\Delta L_{\text{vorh}}$ , die Adaptationsleuchtdichte  $L_A$  und damit die Blackwell-Konstanten A und B bestimmt werden. Aus der Geometrie ergeben sich die Daten zum Sehwinkel und somit  $\Delta L_S$ .

Ist der gemessene Leuchtdichteunterschied  $\Delta L_{\text{vorh}}$  größer als die nach Adrian zur Detektion benötigte  $\Delta L_S$ , so muss ein Fahrer ein Hindernis erkennen. Die Aufnahme, bei der dies erfüllt ist und die am nächsten zum Objekt aufgenommen wurde, bestimmt die Erkennungsentfernung. Ein Fahrer, der eine Person trotzdem nicht erkennt, war entweder abgelenkt oder ist unter Umständen nicht normalsichtig. Viele, gerade ältere Fahrer leiden unter erhöhter Blendempfindlichkeit oder verminderter Sehleistung unter mesopischen Bedingungen (vulgo: Nachtblindheit).

### 2.2.4 Ergebnisse und Relevanz für diese Arbeit

Die Ergebnisse für diesen Fall können im Anhang C im Detail eingesehen werden, Tabelle 3 fasst sie zusammen.

**Tabelle 3: Übersicht über die errechneten Erkennungsentfernungen in Abhängigkeit von Blendung und Beleuchtungszustand des Unfallfahrzeugs**

Blendung	Abblendlicht	Fernlicht
Ohne Blendung	40 m	100 m
Mit Blendung	30 m	75 m

Es geht aus den Messungen und Berechnungen klar hervor, dass ein Kraftfahrer mit Abblendlicht erst in einer Entfernung von 40 m die Chance hatte, den Fußgänger mit Sicherheit erkennen zu können. Unter gleichen Bedingungen wäre dies mit Fernlicht schon 60 m vorher der Fall gewesen. Unter Blendung reduzieren sich beide Erkennungsentfernungen, jedoch bleibt der Vorteil des Fernlichtes erhalten.

Der begutachtete Fall verdeutlicht eindrucksvoll, worum es in dieser Arbeit letztlich geht. Zum einen ist die Benutzung des Fernlichtes im außerörtlichen Straßenverkehr wichtig, um Unfälle zu vermeiden. Zum anderen erschwert die Blendung die Erkennbarkeit für den Gegenverkehr. Damit ist das Ziel dieser Arbeit definiert, nämlich Anforderungen an die zukünftige Generation von adaptiven Fernlichtassistenzsystemen zu formulieren, die einerseits eine signifikante Verbesserung der nächtlichen Sehleistung des Fahrers ermöglichen. Andererseits geht es um die Verhinderung von unbotmäßiger Blendung des Gegenverkehrs durch eben diese Systeme.

## 2.3 Analyse der gesetzlichen Zulässigkeit

In diesem Kapitel sollen die relevanten Gesetze, Verordnungen und Regelungen beschrieben und interpretiert werden. Dabei sind auch Kommentare und Urteile zum Thema Fahrzeugbeleuchtung ausgewertet worden. Bei Interpretationen von ECE-Regelungen ist zu berücksichtigen, dass diese teilweise mit verantwortlichen Mitarbeitern von Behörden und Regierungsinstitutionen erarbeitet wurden. Andere Personen könnten andere Ansichten zu einzelnen Auslegungen haben.



---

### 2.3.1 Straßenverkehrsordnung StVO

Der entscheidende Paragraph für die Kraftfahrzeugbeleuchtung in der Straßenverkehrsordnung ist §17. Für Systeme, die die Fernlichtfunktion steuern sollen, ist Absatz 2 entscheidend:

„Mit Begrenzungsleuchten (Standlicht) allein darf nicht gefahren werden. Auf Straßen mit durchgehender, ausreichender Beleuchtung darf auch nicht mit Fernlicht gefahren werden. Es ist rechtzeitig abzublenken, wenn ein Fahrzeug entgegenkommt oder mit geringem Abstand vorausfährt oder wenn es sonst die Sicherheit des Verkehrs auf oder neben der Straße erfordert. Wenn nötig, ist entsprechend langsamer zu fahren.“

Satz 2 dieses Absatzes schreibt somit vor, dass bei ortsfester Straßenbeleuchtung das Fernlicht abzuschalten ist. Diese Beleuchtung muss allerdings *durchgehend* vorhanden sein. Die StVO macht jedoch keine Angabe darüber, welches Beleuchtungsniveau *ausreichend* ist. In Kommentaren zur StVO wird das Abblendlicht als das Standardlicht für innerörtliche Straßen bezeichnet, aus dem Grunde der Blendungsgefährdung. Gleichzeitig wird aber eingeschränkt, dass bei *schlechter* Beleuchtung mit Fernlicht gefahren werden darf. Auch hier werden die entscheidenden Adjektive nicht präzisiert, weshalb im Streitfall ein Richter entscheiden muss, ob das Benutzen der Fernlichtfunktion angemessen war oder nicht. Für adaptive Fernlichtsysteme ist daher ein Umschalten auf Abblendlichtmodus zu empfehlen, wenn ortsfeste Beleuchtung detektiert wird.

Auch bei der Definition von Abblendentfernungen bleibt die StVO vage. §17 Abs. 2 Satz 3 schreibt lediglich vor, dass *rechtzeitig* abzublenken ist, wenn Verkehr entgegenkommt oder in *geringer Entfernung* vorausfährt. Nun ist die Definition von *rechtzeitig* wiederum den Gerichten und Kommentatoren überlassen worden. Laut [40] ist rechtzeitig abgeblendet, „wenn der Entgegenkommende nicht ins Scheinwerferlicht gerät. Deshalb wird in der Regel vor Kurven abzublenken sein, es sei denn, es kommt in naher Entfernung niemand entgegen.“ Dies ist aus ingenieurstechnischer Sicht eine sehr unbefriedigende Definition. Zum einen kann nicht verhindert werden, dass der Gegenverkehr ins „Scheinwerferlicht“ gerät; es ist auch nicht wünschenswert, denn dann wäre das eigene Fahrzeug quasi unsichtbar. Zum anderen erfährt der Gegenverkehr auch durch das Abblendlicht eine, wenn auch tolerierte, Blendung.

Vielmehr sollten Grenzwerte für die Blendbelastung ermittelt werden, die eingehalten werden müssen. Eignen könnten sich dazu Referenzwerte, die sich an der vorgeschriebenen Beleuchtungsstärke für den Punkt B50L bei Abblendlicht Klasse C [1] orientieren.

Zahlreiche Untersuchungen seit den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhundert haben gezeigt, dass es für die Höhe der Beeinträchtigung durch Blendung nicht auf die Blendbeleuchtungsstärke alleine ankommt, sondern ebenfalls auf Blendwinkel, Adaptationsleuchtdichte, Größe, Spektrum und Strahldichte der Blendquelle. Daher werden zu diesem Punkt praxisnahe Untersuchungen durchgeführt, die unter Geometrien stattfinden, die im Straßenverkehr häufig auftreten. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Forschungsarbeit zu dem Thema durchgeführten Untersuchungen finden sich in Kapitel 5.

Auch die Bedeutung von Vorausfahrenden in „*geringer Entfernung*“ ist durch die Gerichte für Deutschland präzisiert worden. Nach [41] ist selbst auf Autobahnen auch eine Entfernung von 100-150 m „nicht gering“. Ebenfalls besteht keine Pflicht zum Abblenden, wenn ein Kraftfahrer überholt wird, wenn es danach nicht zum Kolonnenfahren in geringem Abstand kommt. Des Weiteren darf beim Überholen in der Regel das Fernlicht eingeschaltet bleiben, um das Überblicken der weiteren Strecke zu ermöglichen.

---

Generell ist darauf hinzuweisen, dass der Fahrzeugführer „...innerhalb der übersehbaren Strecke anhalten...“ [42] können muss (Sichtfahrgebot). Auf sehr schmalen Straßen „...muss er jedoch so langsam fahren, dass er mindestens innerhalb der Hälfte der übersehbaren Strecke halten kann“. Der Fahrzeugführer sollte also ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass auch die adaptiven Fernlichtsysteme ihn nicht von der Pflicht der Einhaltung des Gebotes entbinden oder die Geschwindigkeit automatisch regeln.

### 2.3.2 Verwaltungsvorschrift zur StVO

Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (Vwv StVO) präzisiert in den Ausführungen zu §17 Abs. 2, „dass der Abblendpflicht auch gegenüber Radfahrern auf Radwegen sowie bei der Begegnung mit Schienenfahrzeugen und gegenüber dem Schiffsverkehr, falls die Führer dieser Fahrzeuge geblendet werden können, genügt“ [43] werden muss. In den bisherigen Fahrversuchen hat sich gezeigt, dass entgegenkommende Radfahrer zuverlässig erkannt werden können. Da der Schienenverkehr ebenfalls über Scheinwerfer verfügt, ist auch hier kein Problem zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit, dass Schiffsverkehr durch das eigene Fernlicht geblendet werden könnte, ist extrem gering. Ein Hinweis in der Bedienungsanleitung zur Abblendpflicht könnte aber sinnvoll sein.

Die Vwv StVO verpflichtet ebenfalls zum Abblenden bei entgegen kommenden Fußgängerverbänden. Wegen einzelner Fußgänger muss nicht abgeblendet werden, es sei denn diese würden durch die Blendung gefährdet. Alltägliche Beobachtungen legen jedoch nahe, dass Fußgänger außerhalb der Ortschaft eher gefährdet sind, wenn Autofahrer das Fernlicht nicht benutzen (vgl. dazu u.a. [36]).

Da sie jedoch in der Regel keine eigenen Lichtquellen mitführen, werden sie durch die Bildverarbeitung der jetzigen adaptiven Fernlichtsysteme nicht erkannt. Der Fahrer ist dementsprechend aufzufordern, die Fußgänger zu entblenden, wenn diesen durch Blendung Gefahr drohen könnte. Dies hat zudem den Vorteil, dass der Fahrer den Fußgänger in jedem Fall erkannt hat und auch bei Abblendlicht weiterhin sehen und ihm ausweichen können wird.

Da nachts nicht nur der Mangel an Ausleuchtung zu vermehrten und schwereren Unfällen führt, sondern auch erhöhter Alkohol- und Drogenkonsum sowie Müdigkeit, ist es schwierig, das Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit abzuschätzen. Durch HUMMEL [44] wurden dazu theoretische Untersuchungen anhand von Unfallstatistiken durchgeführt und vorgestellt. Das Ergebnis legt nahe, dass 58% aller Unfälle mit Fußgängern und 74% aller Unfälle mit unbeleuchteten Objekten durch bessere Beleuchtung (Tageslichtniveau) vermeidbar wären. Natürlich kann auch Fernlicht nicht zu einer tageslichtähnlichen Beleuchtungssituation führen, aber ein Großteil aller Unfälle wäre wahrscheinlich zu verhindern.

Einen weiteren Hinweis darauf, dass verbesserte Scheinwerfertechnologien schon jetzt zu einem Sicherheitsgewinn geführt haben, lässt sich auch aus Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [45] ersehen. Da innerörtliche, und daher auch mit zusätzlicher Straßenbeleuchtung nicht vermeidbare, Unfälle seit 1991 (Einführung der Gasentladungsscheinwerfer) am wenigsten abgenommen haben, steht zu vermuten, dass der höhere Rückgang außerorts zu einem Gutteil auf bessere Beleuchtung der Straße durch die Automobilscheinwerfer zurückzuführen ist. Zu dem gleichen Ergebnis kommt auch eine Studie des TÜV Rheinland [35], die ein deutlich verringertes nächtliches Unfallrisiko bei Fahrzeugen feststellt, die mit Xenon-Scheinwerfern ausgerüstet sind [34].



---

### 2.3.3 Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)

Für die Lichttechnik relevante Zulassungsvoraussetzungen für Kraftfahrzeuge sind in den §§49a-54b StVZO geregelt. Da für diese Arbeit speziell Regelungen für Abblend- und Fernlicht von Belang sind, beschränkt sich die Analyse der StVO auf den §50 Abs. 4-10. Zunächst wird festgelegt, dass für die Erzeugung des Fernlichtes zusätzliche Scheinwerferpaare angebracht sein dürfen. Das Abblendlicht soll auch bei angeschaltetem Fernlicht weiterhin aktiviert sein. Für das Fernlicht wird als einzige photometrische Voraussetzung (Abs. 5) eine Mindestbeleuchtungsstärke von 1 lx im Abstand von 100 m vor dem Fahrzeug und in Höhe der Scheinwerfermitte gefordert. Diese Forderung liegt weit unter den Vorschriften der ECE-Regelung 123. Jene definiert mindestens 48 lx im Punkt H-V (auf der optischen Bezugsachse der Scheinwerfers) in 25 m Entfernung, was umgerechnet 3 lx in 100 m Entfernung entspricht.

Abs. 6 enthält die Anbauvorschriften, wobei auch auf die Beschaltung der Scheinwerfer und Kontrolllampen eingegangen wird. Dabei wird vorgeschrieben, dass die Fernlichtscheinwerfer nur gleichzeitig und gleichmäßig abgeblendet werden dürfen (siehe ebenfalls Abs. 9). Dabei gilt als abgeblendet, wenn das System in 25 m Entfernung vor dem Fahrzeug und in Scheinwerferhöhe vor jedem einzelnen Scheinwerfer und in Scheinwerferhöhe nur noch 1 lx erzeugt. Nicht explizit geregelt wird, wie schnell das Abblenden zu erfolgen hat. Schon SCHMIDT-CLAUSEN [46] beschreibt, dass das kontinuierliche Dimmen des Fernlichtes zwar zu einer leichten Erhöhung der Blendbelastung des Gegenverkehrs führt. Jedoch werden die Nachteile dadurch aufgehoben, dass die langsame Dunkeladaptation des Fahrzeugführers durch das langsamere Absenken der Beleuchtungsstärke kompensiert werden kann.

Diese Erkenntnis würde sich auch auf ein Absenken der Hell-Dunkel-Grenze übertragen lassen, da auch hier die Blendbeleuchtungsstärke stetig verringert wird und gleichzeitig dem Fahrer eine optimale Sichtweite garantiert ist. Wahrscheinlich als Reaktion auf die neuen Erkenntnisse von SCHMIDT-CLAUSEN, wurde im Amtsblatt des Bundesministers für Verkehr eine Vorschrift für die Beschaffenheit eines elektronischen Steuergerätes zur verzögerten Abschaltung des Fernlichtes erlassen [47]. Zentrale Forderungen in der Vorschrift sind, dass die Dimmung nicht länger als 5 Sekunden dauern darf, dass sie vollständig selbstständig durchlaufen werden muss und dass auch eine verzögerungsfreie Umschaltung möglich sein muss.

Die Vorschrift, dass nur gleichmäßig abgeblendet werden darf, würde einem adaptiven Fernlichtsystem wie der Gleitenden Leuchtweite nicht entgegenstehen, da auch hier die Leuchtweite beider Seiten gleichmäßig herabgesetzt wird. Damit ist ebenso eine kontinuierliche Verringerung der Blendbeleuchtungsstärke verbunden. Andere Systeme wie Matrix Beam oder das Maskierte Dauerfernlicht werden diese Voraussetzung vermutlich ebenso erfüllen.

Abs. 10 regelt die besonderen Vorkehrungen für Scheinwerfer mit Gasentladungslampen. Dabei werden wie in der entsprechenden ECE-Regelung 48 Scheinwerferreinigungsanlage, automatische Leuchtweiteregelung und ein System gefordert, dass das ständige Eingeschaltetsein des Abblendlichtes auch während des Fernlichtmodus sicherstellt.

### 2.3.4 ECE-Regelungen

Neben den für die jeweiligen Lichtquellen einschlägigen Zulassungsvoraussetzungen sind für ein adaptives Fernlichtsystem die ECE-Regelungen R 48 und R 123 relevant. Diese werden durch EU-Verordnungen referenziert und sind daher unmittelbar auf die Bundesrepublik anzuwenden. Während die

---

ECE R 123 die photometrischen Kennwerte für ein adaptive Frontbeleuchtungssystem (AFS) festlegt, ist in ECE R 48 geregelt, auf welche Weise und unter welchen Voraussetzungen die einzelnen Lichtverteilungen und –funktionen aktiviert werden dürfen und weitere Anbauvorschriften. Im Folgenden soll analysiert werden, inwieweit ein adaptives Fernlichtsystem nach dem Prinzip der gleitenden Leuchtwerte innerhalb der bestehenden Regelungen realisiert werden kann.

---

## Fernlicht

---

Da es sich um ein adaptives Fernlichtsystem handelt ist zunächst zu prüfen, welche photometrischen Anforderungen die R 123 an eine Fernlichtverteilung stellt (Teil 6 Abs. 6.3). Die wichtigsten Textpassagen sind:

- 6.3.2.1. HV shall be situated within the isolux 80 per cent of maximum illumination of the driving beam.
- 6.3.2.1.1. This maximum value ( $E_M$ ) shall not be less than 48 lx. The maximum value shall in no circumstances exceed 240 lx;
- 6.3.2.2. Starting from point HV, horizontally to the right and left, the illumination of the driving beam shall be not less than 24 lx up to 2.6 deg and not less than 6 lx up to 5.2 deg.
- 6.3.3. The illumination or part thereof emitted by the system may be automatically laterally moved (or modified to obtain an equivalent effect), provided that:
  - 6.3.3.1. the system meets the requirements of the paragraphs 6.3.2.1.1. and 6.3.2.2. above with each lighting unit measured according to the relevant procedure indicated in Annex 9.

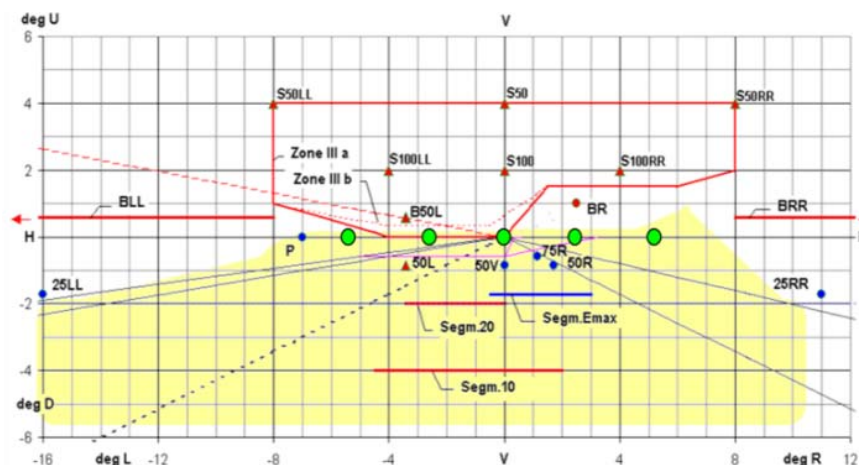
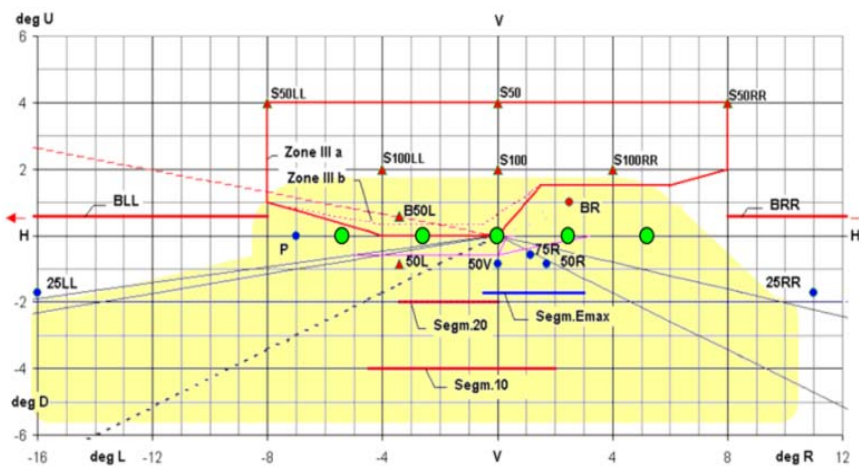
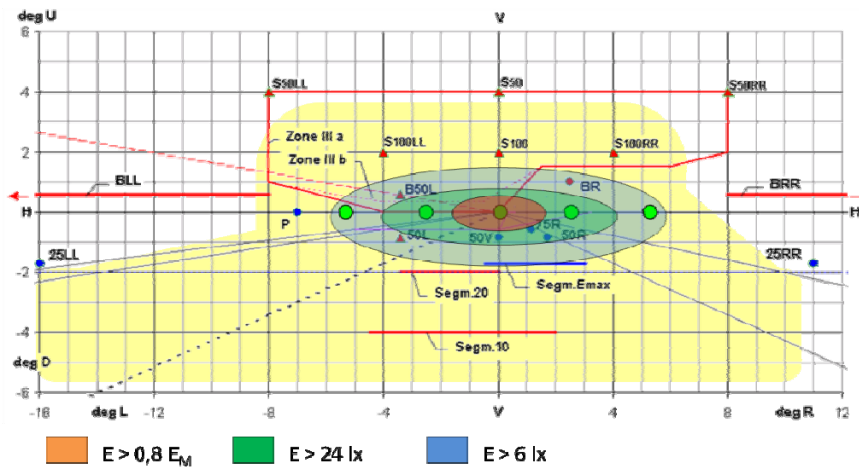
Aus dieser Textpassage wird deutlich, dass es keine komplexen Anforderungen an eine Fernlichtverteilung gibt. Tatsächlich werden nur photometrische Anforderungen an Messpunkte definiert, die sämtlich auf der H-H-Linie liegen. Solange also eine Fernlichtverteilung die Anforderungen an diese fünf Punkte erfüllt, kann also eine bestehende Lichtverteilung verändert werden, ohne dass der Fernlichtstatus nach den ECE-Richtlichtlinien zu beanstanden ist. Damit ist eine graduelle Absenkung der Hell-Dunkel-Grenze in Richtung der H-H-Linie möglich. Erst wenn diese Linie erreicht wird, muss in den Abblendlichtmodus gewechselt werden. Unabhängig von der Modulation der Fernlichtverteilung sollte zu jeder Zeit gewährleistet sein, dass die photometrischen Anforderungen an ein Abblendlicht erfüllt werden (bei asymmetrischem Abblendlicht).

Die Abbildung 9 soll deutlich machen, wie die Lichtverteilung verändert werden kann.

In allen drei Teilbildern symbolisiert der blass gelbe Hintergrund eine mögliche Fernlichtverteilung. Die halbtransparenten grünen, orangenen und roten Teilbereiche in Abbildung 1a) entsprechen unterschiedlichen Isolux-Bereichen, wie sie in der ECE-R123 gefordert sind. Dabei stellt der rote Bereich die 80%-Isolux-Linie dar, der gelbe den 24 lx- und der grüne den 6 lx-Bereich dar. Die grünen Punkte markieren die einzigen definierten Messpunkte der Regelung.

Die Fernlichtverteilung, die in Abbildung 9a) voll ausgeprägt ist, kann durch geeignete variable Blenden oder andere Mittel teilweise abgedunkelt werden, ohne die übrige Lichtverteilung wesentlich zu beeinflussen. Abbildung 9b) zeigt eine Zwischenstufe, die z.B. vorkommen könnte, wenn ein Auto auf einer Anhöhe entgegenkommt.

Auch die Fernlichtverteilung in Abbildung 9c) entspricht noch den genannten Kriterien, da die Hell-Dunkel-Grenze noch leicht über den Messpunkten liegt. Weit entfernte, leicht erhöhte Objekte könnten so noch entblendet werden.



**Abbildung 9: Mögliche Veränderung der Fernlichtverteilung innerhalb der Grenzen der ECE-R123**

Soll die Leuchtweite noch weiter reduziert werden, so müsste nach den im Moment gültigen Vorschriften nach ECE auf Abblendlicht umgeschaltet werden.

Dies bedeutet für das System GLW, dass Objekte, die über der Horizontlinie liegen, automatisch entblendet werden können, ohne in Konflikt mit der derzeitigen Regelung für das Fernlicht zu geraten. Wird das Objekt jedoch unterhalb der H-H-Linie erkannt, muss zum Entblenden in den Abblendlichtmodus geschaltet werden. In wie weit in diesem Bereich innerhalb der bestehenden Regelungen Möglichkeiten zur variablen Gestaltung bleiben, soll im folgenden Unterkapitel geklärt werden.

## Abblendlicht

Die Regelungen zum AFS erlauben mehrere Abblendlichtverteilungen. Diese verschiedenen Verteilungen könnten sukzessive durchlaufen werden, um eine Gleitende Leuchtweite zu realisieren. Dabei würde bei weit entfernten Verkehrsteilnehmern zunächst das weiteststrahlende Autobahnlicht (engl. *motorway light*, class E) aktiviert, welches in mehreren Unterstufen zurückgefahren werden kann (E1 bis E3). Dabei können die in Tabelle 4 angegebenen Lagen der Hell-Dunkel-Grenze realisiert werden. Die daraus resultierenden Werte für die relevanten Punkte und Zonen auf dem ECE-Messschirm sind im Anhang E aufgeführt. Die entscheidenden Kenngrößen sind dabei orange und fett umrandet.

**Tabelle 4: Vorgeschriebene vertikale Lage der HDG (in ° unter H-H)**

Abblendlichtklasse	Lage des Cut-offs (nicht höher als)	Aktivierung möglich ab
E	0,23 D	110 km·h <sup>-1</sup>
E1	0,34 D	100 km·h <sup>-1</sup>
E2	0,45 D	90 km·h <sup>-1</sup>
E3	0,57 D	80 km·h <sup>-1</sup>
C	0,57 D	immer

Es wird in der Regelung nicht vorgeschrieben, wie die Übergänge zwischen den verschiedenen Klassen zu gestalten sind. Denkbar ist daher auch ein fließender Übergang, der zeitlich ausgedehnt werden kann.

Aus der nebenstehenden Tabelle und dem im vorhergehenden Kapitel Gesagten ergibt sich, dass man mit der variablen Fernlichtverteilung und dem fließ-

enden Durchschalten der Abblendlichtklassen bereits eine sehr dynamische Gleitende Leuchtweite realisieren könnte. Der einzige Bereich in dem die HDG definitionsgemäß nicht liegen darf, ist der zwischen der Horizont-Linie und 0,23° D, was etwa einer Neigung von 0,4% entspricht. Dies entspräche bei einer Anbauhöhe der Scheinwerfer von 65 cm etwa einer Leuchtweite von 162,5 m. Zu überprüfen wäre daher, ob ein Sprung der HDG von H-H zu dieser Neigung überhaupt wahrnehmbar ist.

Wenn dies nicht der Fall wäre, dann könnte ein System der Gleitenden Leuchtweite technisch innerhalb der photometrischen Anforderungen der ECE-R123 schon heute realisiert werden. Fraglich bleibt jedoch, ob die Regelung der Lichtverteilung über eine Bilderkennung realisiert werden darf.

Dazu muss der Inhalt der Vorschrift ECE-R48 analysiert werden. Eigentlich schreibt deren Abschnitt 6.22.7.3 (s. auch Anhang F) die Arbeitsweise der Steuerung der Lichtfunktionen des AFS vor. Es ist nicht vorgesehen, dass aus der Bildverarbeitung gewonnene Daten zur Kontrolle der AFS-Funktionen genutzt werden. Allerdings ist dieser Abschnitt vor dem Hintergrund der Zeit zu lesen, in der er entstanden ist. Damals war eine komplexe Bildverarbeitung im Auto noch nicht vorstellbar und daher wurden mehrere andere Indikatoren wie Geschwindigkeit, Außenbeleuchtung und Feuchtigkeit herangezogen, um eine Entscheidung über die angemessene Lichtverteilung zu fällen.

Es wird ausdrücklich geregelt, dass das Autobahnlicht nur dann aktiviert werden darf, wenn das eigene Auto eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit (s. Tabelle 4) nicht unterschreitet. So soll sichergestellt werden, dass sich das Fahrzeug auf einer Autobahn oder einer ähnlichen Straße befindet und entsprechende laterale und longitudinale Abstände zwischen Fahrzeugen anzunehmen sind.

Allerdings erlaubt Fußnote 8 in diesem Zusammenhang eine Aktivierung auch, wenn entweder baulich getrennte Fahrspuren vorhanden sind oder, für eine Bildverarbeitung entscheidender, wenn entsprechende laterale Abstände identifiziert werden können.

Nach Gesprächen mit dem Kraftfahrtbundesamt, der Bundesanstalt für Straßenwesen sowie dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Interpretation auch von offizieller Seite gefolgt wird.

---

## Rechtslage für weitere Adaptive Fernlichtsysteme

---

Weitere adaptive Fernlichtsysteme wie maskiertes Dauerfernlicht und MatrixBeam sind in den bestehenden Regelungen noch nicht vorgesehen. Ihre Zulassung müsste daher auf anderem Wege geschehen. Das Regelwerk der Europäischen Union sieht für solche Systeme, die funktionsfähig sind und deren Nutzen erwiesen ist, die Möglichkeit der Sondergenehmigung vor. Diese richtet sich nach den Bestimmungen der Richtlinie 98/14/EG, die die Möglichkeit der Zulassung von Komponenten vorsieht, die aufgrund des technischen Fortschrittes die bestehenden Regelungen nicht erfüllen (können) [48, 49]. Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) gibt ein erklärendes Merkblatt zu dieser Richtlinie heraus [50]. Systeme, die nach den Bestimmungen zugelassen werden sollen, müssen dahingehend untersucht worden sein, ob sie die sicherheits- und umwelttechnischen Bedingungen der eigentlich maßgeblichen Richtlinien erfüllen. Dies kann aber durch andere technische Maßnahmen geschehen, als in den einschlägigen ECE-Regelungen vorgesehen.

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass die erlangte Typgenehmigung zunächst nur auf den Mitgliedsstaat beschränkt ist, in dem sie beantragt wurde. Die Kommission wird durch einen Automatismus zur Prüfung aufgefordert und muss innerhalb von 3 Monaten über die Zulassung des Systems für den gesamten europäischen Wirtschaftsraum entscheiden. Wird diese versagt, bleibt die Typzulassung im Mitgliedsland davon unberührt.

### 2.3.5 Japan

Während einer Vortragsreise nach Japan wurden Gespräche mit den japanischen Automobilzulieferern Denso und Koito geführt. Beide Unternehmen arbeiten derzeit an Assistenzsystemen, die ein adaptives Fernlicht ermöglichen sollen.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Interpretation der ECE-Regelungen wurde mit Mitarbeitern der Unternehmen diskutiert. Diese hatten im Anschluss an die ISAL 2007 bereits die Möglichkeit der Einführung solcher Systeme unter bestehenden ECE-Vorschriften diskutiert. Die bisherige Haltung der japanischen Behörden zu diesem Thema ist allerdings eher negativ. Die japanische Administration hat aber in Aussicht gestellt, im Rahmen eines Parallelabkommens einer möglichen eindeutigen ECE-Regelung folgen zu wollen, die auf der GRE-Konferenz verabschiedet wird.

Die Relevanz eines adaptiven Fernlichtsystems wird für Japan jedoch als gering eingestuft. Da der japanische Verkehr sich hauptsächlich innerhalb stationär beleuchteter Ballungszentren konzentriert, werden die Sichtbedingungen in der Regel auch in Entfernungen von 100-150 m vor dem Fahrzeug als hinreichend gut angenommen. Motivation für die japanischen Hersteller zur Entwicklung und Zulassung eigener Systeme sind daher die Märkte in Europa und den USA.

Ein Umdenken ist derzeit insoweit zu erkennen, als dass die Qualität der Straßenbeleuchtung abseits der Hauptverkehrsadern als gering eingestuft wird. Daher wird die Relevanz adaptiver Fernlichtsysteme zunehmend wohlwollend beurteilt. Die aktive Mitarbeit japanischer Zulieferer in der GTB „Task Force Adaptive Driving Beam“ (TF ADB) lässt also auch auf ein gestiegenes Interesse im asiatisch-pazifischen Raum schließen.

### 2.3.6 USA

Die Recommended Practice J2591 [51] der SAE erlaubt ausdrücklich das horizontale und vertikale Schwenken (Swivelling) der Scheinwerfer. Voraussetzung hierfür ist, dass bei Gegenverkehr automat-



---

isch abgeblendet wird und dann die maximalen photometrischen Werte über der H-H Linie nicht überschritten werden.

Aussagen zur Modifikation der Fernlichtverteilung werden nicht gemacht. Jedoch wird explizit auf die AFS-Regelungen der ECE-Mitgliedsländer verwiesen, deren Regelungen im Allgemeinen im Zuge einer internationalen Harmonisierung anerkannt werden. Tatsächlich sind die meisten Anforderungen umformulierte Absätze aus den entsprechenden Abschnitten der ECE AFS-Regelungen.

Interessant sind die Unterschiede in der amerikanischen Gesetzgebung zum Verhaltensrecht der Autofahrer. So wird im Gegensatz zu den deutschen Vorschriften eine klare Grenze für die Abblendentfernung definiert. Falls Gegenverkehr vorhanden ist, so muss bei einem Begegnungsabstand von 500 Fuß (ca. 150 m) spätestens abgeblendet werden [52]. Diese Grenze ist sicherlich für europäische Normen viel zu kurz gegriffen, in den USA mag sie aufgrund anderer lateraler Abstände im außerörtlichen Verkehr und anderer Lichtverteilungen angemessen sein. Das Fernlicht soll auch ausgeschaltet sein, wenn hinter anderen Kraftfahrern gefahren, eine klare Grenze gibt es jedoch nicht.

### 2.3.7 Weitere Länder

Im Gegensatz zu den USA, die nur eine strikte Angabe zur Abblendentfernung für entgegenkommenden Verkehr machen, gibt es in Kanada auch eine klar definierte Grenze für das Abblenden bei vorausfahrendem Verkehr. Hier gelten 60 m als Mindestabstand, um das Fernlicht benutzen zu dürfen. Für den Fall von Gegenverkehr gelten auch hier 150 m [53].

Während in vielen Ländern die Pflicht besteht, bei Dunkelheit oder schlechter Sicht mit Abblendlicht zu fahren und Fernlicht bei entsprechender Situation benutzen zu dürfen, gilt in Frankreich eine Pflicht zur Benutzung des Fernlichtes [54]. Diese muss in solchen Situationen abgeschaltet werden, in denen auch in Deutschland das Benutzen des Fernlichtes nicht erlaubt ist, d.h. bei Gegenverkehr oder bei in geringem Abstand vorausfahrendem Verkehr und bei durchgehender, ausreichender Straßenbeleuchtung. In Frankreich gelten ebenfalls keine definierten Entfernungen, bei denen spätestens abgeblendet werden muss.

### 2.3.8 Folgerungen über die gesetzliche Zulässigkeit

Die existierenden ECE-Regelungen erlauben bei genauer Interpretation bereits heute eine gleitende Leuchtweite inklusive der nötigen Steuerung durch ein Bilderkennungssystem. Allerdings ist fraglich, ob alle internationalen Interessenträger dieser Argumentation folgen.

Aufgrund der Arbeit mit den zuständigen Behördenvertretern und den involvierten Testhäusern wurde daher der Bedarf einer Erweiterung der existierenden AFS-Bestimmungen hinsichtlich adaptiver Fernlichtsysteme (*engl. adaptive driving beam (ADB)*) deutlich gemacht. Eine Task Force der Groupe de Travail de Bruxelles (GTB) befasst sich mit der Thematik. Ziel ist die Festlegung verbindlicher Standards für solche Systeme.

Unter anderem aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit ist im Oktober 2010 ein Vorschlag für eine Erweiterung der ECE-Regelung 123 aus dem GTB-Gremium in die Groupe de Rapporteur Éclairage (GRE) eingebracht worden, der die allgemeine Zulassung adaptiver Systeme regeln soll [55]. Der Vorschlag ist vom Gremium angenommen worden und wird somit aller Voraussicht nach in absehbarer Zeit vom World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29) diskutiert und veröffentlicht werden.

---

Da die Europäische Union diese Regelung als direkte Rechtsquelle referenziert, ist zu erwarten, dass sie kurz nach der Veröffentlichung auch in der Bundesrepublik verbindlich wird, da die Richtlinien in der Regel schon nach einem Jahr in nationales Recht umgesetzt sein müssen.

## 2.4 Stand der Technik von adaptiven Lichtsystemen

Derzeit wird in der Automobilindustrie an verschiedenen adaptiven Lichtsystemen geforscht. Folgende Systeme können diesen zugeordnet werden:

- Fernlichtassistent
- Adaptives Abblendlicht
- Gleitende Leuchtweitenregelung
- Teilfernlichtsysteme
- Matrixbeam

Im Folgenden werden die einzelnen Kategorien kurz erläutert.

---

### Fernlichtassistent

---

Die Entwicklungshistorie der Fernlichtassistentensysteme beginnt bereits in den fünfziger Jahren mit dem sogenannten Autronic Eye, welches im Konzern General Motors eingesetzt wurde, um das Fernlicht zu dimmen.

Das System bestand aus einem Sensor, welcher auf Basis der empfangenen Beleuchtungsstärke das Fernlichtrelais steuerte. Da dieses System keinerlei bildgebende Verfahren realisiert hat, wurde auch für Straßenbeleuchtung und retroreflektierende Schilder abgeblendet, jedoch nicht für vorausfahrende Wagen. In diesen Fällen konnte das System manuell übersteuert werden. Um den genannten Effekten entgegenzuwirken, wurde später ein Potentiometer hinzugefügt, mit dem die Schaltschwelle vom Benutzer auf die Umgebungsleuchtdichte eingestellt werden konnte. Obwohl sich das System nie durchsetzen konnte, blieb es bis in die achtziger Jahre unter dem Namen Guide Matic im Angebot.

In Europa machten sich die Lichtentwickler zunächst vor allem um die Auswirkungen des Wechsels von Fernlicht auf Abblendlicht Gedanken. Es wurde untersucht, ob das plötzliche Abschalten des Fernlichtes negative Auswirkungen auf die Sichtweite des Autofahrers hat, da er sein Adaptationsniveau plötzlich auf Abblendlicht anpassen muss. Es wurde vorgeschlagen, den Abblendvorgang zeitlich auszudehnen, um die Anpassung graduell gestalten zu können, wie bereits in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

Heutige Fernlichtassistenten nutzen sämtlich eine Kamera, um andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig erkennen zu können. Dabei wird das Videobild hinsichtlich Leuchtdichte und Farbe von Objekten gefiltert, um neben entgegenkommenden Fahrzeugen auch Vorausfahrende zuverlässig erkennen zu können. Um auch retro-reflektierende Schilder und Begrenzungspfähle von Scheinwerfern unterscheiden zu können, werden verschiedene Objekte auch verfolgt. Ruhen diese Objekte, ist es mit hoher Wahrscheinlichkeit kein Verkehrsteilnehmer und muss somit nicht entblendet werden.

Fernlichtassistenten übernehmen jedoch das reine Schalten zwischen Abblendlicht und Fernlicht. Es gibt keinerlei adaptive Lichtverteilung, der Funktionsumfang der Beleuchtungsanlage wird nicht erweitert. Daher handelt es sich daher rechtlich um eine Komfortfunktion. Allerdings führt auch dieses System schon zu einem deutlich erhöhten Nutzungsgrad des Fernlichtes gegenüber der manuellen Bedienung und ermöglicht so einen Sicherheitsgewinn.

---

### Adaptives Abblendlicht (AFS)

---

---

Die ersten Entwicklungen hin zu adaptiven Scheinwerfersystemen bezogen sich zunächst auf das schon beschriebene adaptive Abblendlicht, welches zunächst ein Schwenken der Lichtverteilung in Kurven ermöglichte. Diese Regelung, die als Eingangsvariablen vor allem Fahrdynamik und Lenkwinkel auswertet, erhöhte die Verkehrssicherheit, indem es eine höhere Sichtweite in die Kurveninnenseiten ermöglichte (siehe u.a. [56, 57]).

Da die Auswertung der genannten Eingangssignale mit sich bringt, dass die Kurve erst dann optimal ausgeleuchtet wird, wenn das Fahrzeug sich bereits in Kurvenfahrt befindet, führte zu Versuchen, die Fahrtstrecke vorherzusagen, d.h. einen prädiktiven Algorithmus zur Steuerung der Beleuchtung zu finden. Die meisten Ansätze versuchen, das digitale Kartenmaterial des Navigationsgerätes zur Vorhersage einzusetzen. Schwierigkeiten gibt es allerdings unter anderem dadurch, dass nicht für alle Gebiete Daten in ausreichendem Detaillierungsgrad vorliegen. Daher soll in Zukunft eine Fahrspurerkennung per Kamerasystem eine zuverlässigere Vorhersage über die wahrscheinlichste Trajektorie des Fahrzeugs ermöglichen [58].

---

### **Gleitende Leuchtweitenregelung**

---

Die Abblendlichtverteilung, auch bei AFS, unterliegt wie oben erläutert strengen Anforderungen an die Lage der Hell-Dunkel-Grenze, um Gegenverkehr nicht zu blenden. Diese Hell-Dunkel-Grenze kann mit den Informationen aus den Kamerasystemen jedoch angepasst werden.

Aus der Position der identifizierten Objekte im Kamerabild kann auf die relative Lage der Verkehrsteilnehmer zum eigenen Standort geschlossen werden. Daraus lässt sich der Neigungswinkel der Scheinwerfer errechnen, unter dem diese Objekte gerade nicht geblendet werden. Die mittlere Leuchtweite lässt sich damit wesentlich erhöhen, was der Unfallprävention zugutekommt, denn damit erhöht sich die Detektionsweite des Fahrers und erhöht somit die Zeit, die zwischen Erkennen eines Hindernisses und dem möglichen Zusammenstoß mit diesem verbleibt (time to collision, Abk.: TTC). Es erhöht sich somit auch die Zeit, die dem Fahrer verbleibt, um einen Unfall zu vermeiden.

---

### **Teilfernlichtsysteme**

---

Diese Systeme zeichnen sich durch das Fehlen einer traditionellen horizontalen Hell-Dunkel-Grenze aus. Durch bewegliche Schatter im Strahlengang der Scheinwerfer werden zusätzliche, vertikale Hell-Dunkel-Grenzen eingeführt, die seitlich verschoben werden können. Somit können auch die Bereiche rechts und links von detektierten Objekten ausgeleuchtet werden [59, 60]. Da sich Hindernisse in der Regel am Fahrbahnrand aufhalten, ist der zur Detektion wichtige Bereich durch die beiden vertikal abgegrenzten Bereiche gut ausgeleuchtet. Lediglich detektierte Objekte und der Bereich zwischen und über diesen werden nicht ausgeleuchtet [61]. Ein gängiger Begriff für ein solches System ist auch „maskiertes Dauerfernlicht (MDF)“.

---

### **Matrixbeam**

---

Der Matrixbeam setzt seine Lichtverteilung aus einzelnen, abschaltbaren Sektoren zusammen, weshalb er auch „Pixellicht“ genannt wird [62]. Erste Versuche zu diesen Systemen wurden mit herkömmlichen Digitalprojektoren als Scheinwerfer durchgeführt. Die hohe Anfälligkeit dieser Systeme verhindert jedoch einen Serieneinsatz im Automobil.

Als weniger anfällige Lichtquelle kommt daher in den heutigen Forschungsprojekten eine LED-Matrix zum Einsatz (vgl. etwa [24, 44, 63, 64]). Die LEDs werden über ein Projektionssystem in den Verkehrsraum abgebildet. Da jede einzelne LED gedimmt werden kann, können Bereiche gezielt ausgeblendet werden. In Gegensatz zum Teilfernlicht können somit auch die Bereiche über und zwischen detektierten Objekten ausgeleuchtet werden, wenn die örtliche Auflösung und damit die



---

Anzahl der LEDs groß genug ist. Ebenso können einzelnen Bereiche vor dem Fahrzeug gezielt angestrahlt werden, um Gefahren zu markieren [65, 66].

Durch die hohe Packungsdichte der Hochleistungsleuchtdioden entsteht auch eine große Wärmeleistungsdichte, die ein aktives Kühlkonzept erfordert. Bisherige Ansätze zeigen sowohl Peltierelemente, Wasserkühlung oder Heatpipes als Möglichkeiten zur Wärmeableitung.

Weiterer Nachteil dieser Systeme ist, dass mit den LEDs auch deren Abstand voneinander (*engl.*: pitch), der wegen der Kontaktierung und Toleranzen notwendig ist, in den Verkehrsraum abgebildet wird. Es entsteht ein Schachbrettmuster im Verkehrsraum, das von den meisten Testpersonen als störend empfunden wird. Dieses kann etwa durch Primäroptiken reduziert werden oder es wird eine Unschärfe erzeugt, die die einzelnen Sektoren ineinander übergehen lässt. Unscharfe Sektoren führen jedoch zu unerwünschtem Streulicht in eigentlich zu entblendende Bereiche.

Zu den optischen Herausforderungen gehört auch, dass eine LED-Matrix (Matrix Beam, MB) eine große räumliche Ausdehnung hat. Damit sind die Anforderungen an das optische System wesentlich größer als bei herkömmlichen Glühfaden- oder Entladungsbogenlampen, da alle Bereiche scharf in den Verkehrsraum abgebildet werden müssen. Dieser Nachteil könnte etwa durch den Einsatz von Primäroptiken und achromatische Projektionslinsen vermindert werden [67].

### 3 Vergleich Performance Mensch – adaptive Fernlichtsysteme

Nachdem nun verschiedene Fernlichtsysteme vorgestellt wurden, stellt sich die Frage, welchen Nutzen sie tatsächlich bieten können.

Zur Aufdeckung der Potenziale von adaptiven Fernlichtsystemen werden Fahrversuche am Fachgebiet Lichttechnik durchgeführt, die das Bedienverhalten der Fernlichtfunktion durch den Menschen untersuchen. Zum einen soll festgestellt werden, wie häufig die Funktion genutzt wird und zum anderen, ob durch Fehlbedienungen Blendung des Gegenverkehrs hervorgerufen wird und wie oft und wie lange diese Zustände auftreten. Bisher gibt es Untersuchungen dazu nur in unzureichender Menge und zu geringem Detaillierungsgrad.

#### 3.1 Bisherige Untersuchungen

In Forschungsarbeiten wurde aus den Daten von Steuergeräten ermittelt, dass die Fernlichtfunktion in den USA nur zu unter 8 % der gesamten Fahrzeit eingeschaltet ist (s. Abbildung 12). Eine Unterscheidung in Tag- und Nachtfahrten ist nicht möglich. Für Europa gibt es im Unterschied zu den Vereinigten Staaten diesbezüglich noch keine verlässliche Studie.

Dies hat auch der Deutsche Verkehrsexpertentag [68] festgestellt und kommt daher zu einer EntschlieÙung, dass eine europaweite Untersuchung der Fernlichtnutzung und der damit verbundenen Potenziale durchgeführt werden soll.

SULLIVAN et al. [69] schließen aus der am Straßenrand gemessenen, von herannahenden Fahrzeugen ausgehenden Beleuchtungsstärke auf den Fernlichtzustand. Übersteigt die gemessene Beleuchtungsstärke den Wert von  $E = 1,05 \text{ lx}$  wird das entsprechende Fahrzeug als Fernlicht nutzend deklariert, anderenfalls als Abblendlicht nutzend.

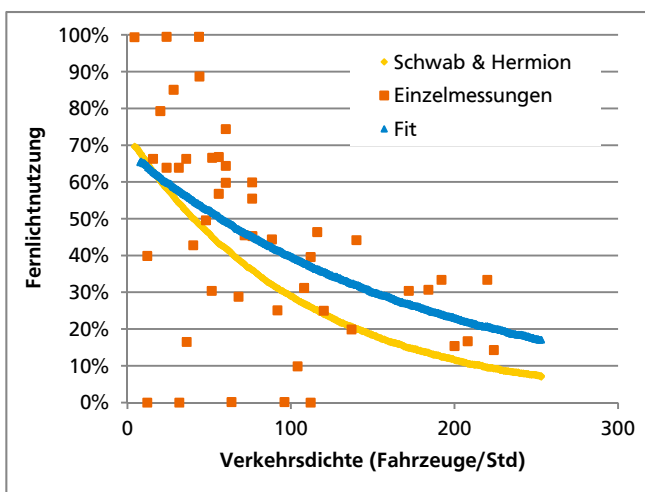


Abbildung 10: Fernlichtnutzung USA, Werte aus Beleuchtungsstärkemessung

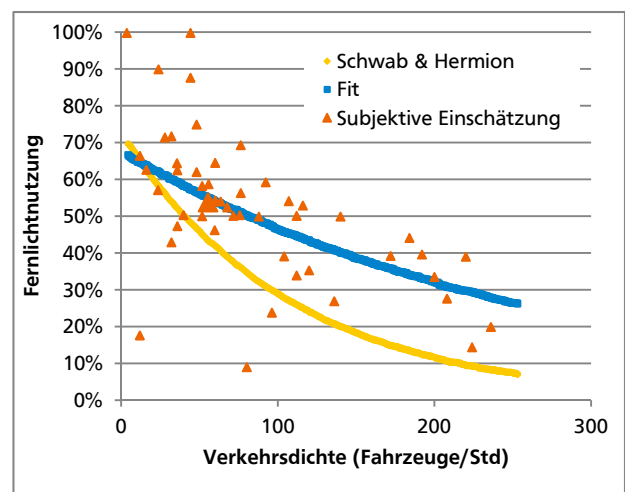


Abbildung 11: Fernlichtnutzung in USA, Werte generiert aus subjektiver Schätzung

Zusätzlich versuchten sie, diese Messwerte mit einer subjektiven Beurteilung über den Beleuchtungszustand zu validieren. Problematisch an dieser Art der Beurteilung ist, dass falsch eingestellte

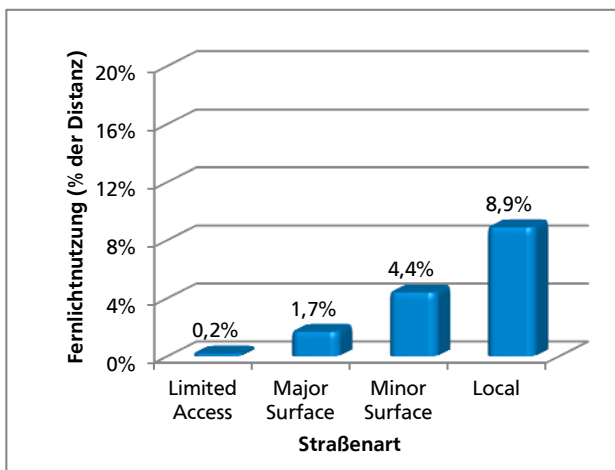
Scheinwerfer zu falschen Ergebnissen führen können. So führte Schmidt-Clausen [70] einen ähnlichen Versuch durch, wobei festgestellt wurde, dass etwa 50 % aller Fahrzeuge zu hohe Beleuchtungsstärken im Punkt B50L aufweisen, also vermutlich falsch eingestellt oder schlecht gereinigt sind. So sind auch die Unterschiede zwischen subjektiver Beobachtung und der aus den Messungen gewonnenen Werten erklärlich (Übereinstimmungsquote 80%).

Die ermittelten Ergebnisse (s. Abbildung 10 auf Seite 29) scheinen auf den ersten Blick recht hoch auszufallen, ein Vergleich mit den Arbeiten von Schwab & Hermion [71], ebenfalls im Diagramm eingetragen, bestätigt diesen Eindruck, wobei die Werte aus der Beleuchtungsstärkemessung überraschenderweise näher an den Werten von Schwab liegen als die der subjektiven Beurteilung in Abbildung 11. Bei dieser Bewertung ist die Streuung allerdings geringer.

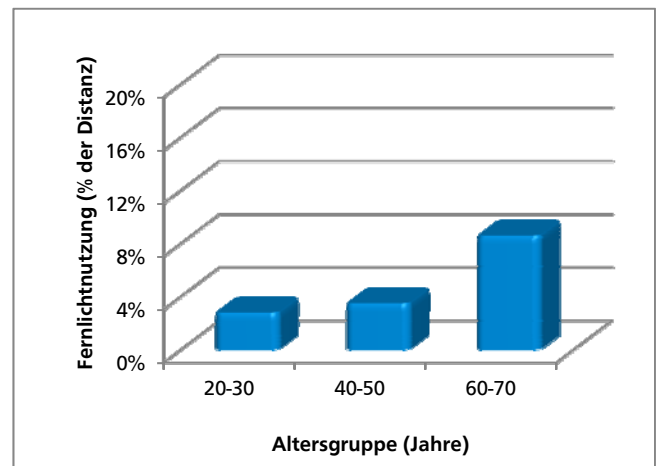
Leider ermöglicht die Studie keine Aussage über das Fahrerverhalten über einen längeren Zeitraum. Es fehlt auch der Einfluss der Straßengeometrie, denn die Werte wurden an einem festen Platz aufgenommen. Am schwersten wiegt allerdings, dass keine Aussage über Fehlverhalten und Risikokompensation möglich ist, was auch von den Begutachtern des Artikels angemahnt wird.

Eine spätere Studie des University of Michigan Transport Research Institute (UMTRI) [72] führt die Untersuchung fort. In dieser werden die Probanden für einen Zeitraum von mehreren Wochen mit Testfahrzeugen ausgestattet, die mehr als 500 Datenströme über den Fahrzeugzustand während der Alltagsfahrten aufzeichnen. Unter anderem werden auch Videodaten des Fahrergesichtes und der Verkehrssituation aufgezeichnet.

Allerdings wird auch hier keine Aussage über Fehlerraten getroffen, obwohl die dazu notwendigen Daten vorhanden sind. Ebenfalls wird das Fahrerverhalten (z.B. Geschwindigkeit) nicht in Zusammenhang mit der Fernlichtnutzung gebracht. Lediglich die durchschnittliche Nutzungsdauer und deren Abhängigkeit von Alter und Straßenart werden untersucht.



**Abbildung 12:** Fernlichtnutzung in USA, aufgeschlüsselt nach Straßenart



**Abbildung 13:** Fernlichtnutzung in USA, aufgeschlüsselt nach Nutzeralter

Dabei werden die Daten nur bezogen auf die Gesamtfahrstrecke angegeben und nicht für die Fahrstrecke bei Nacht. Dieser Umstand macht die Analyse dieser Daten zur Ableitung von Potenzialen und Risiken von adaptiven Fernlichtsystemen weitgehend wertlos. Auch werden die weiteren aufgenommen Datenkanäle, wie etwa Geschwindigkeit oder Verkehrssituation, in dieser Studie nicht ausgewertet. Die Ergebnisse der Studien [73] lassen sich durch Abbildung 12 und Abbildung 13 zusammenfassen.

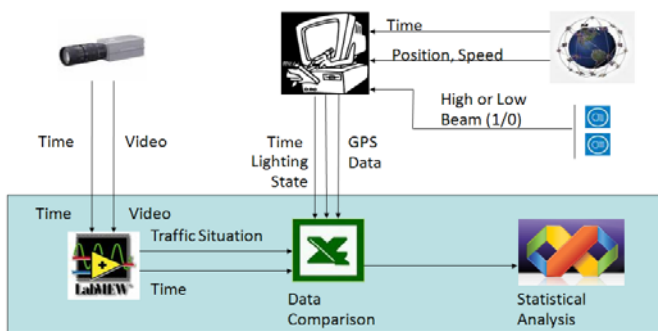
Die wichtigste Aussage dieser Studie ist die Tatsache, dass alte Probanden häufiger Fernlicht einschalten. Die Autoren vermuten eine Kompensationsstrategie für nachlassende Empfindlichkeit der Augen. Eine mögliche Erhöhung der gefahrenen Geschwindigkeit durch die Testpersonen aufgrund der besseren Sichtverhältnisse wird jedoch nicht untersucht.

## 3.2 Eigene Studie

Die in den UMTRI-Untersuchungen nicht aufgegriffen Fragen sollen in einer eigenen Studie beantwortet werden. Schwerpunkt ist nicht die Vermessung einer großen Anzahl von Wagen an einer festen Stelle, sondern die Auswertung des Fahrerverhaltens über einen längeren Zeitraum hinweg.

### 3.2.1 Testkonzept

Um aussagekräftige Ergebnisse zu generieren, wird ein Versuchsträger aufgebaut (Audi A6), der mit einem Videosystem zur Objekterkennung ausgerüstet ist. Gleichzeitig wird der Zustand des Fernlichtes (aus/an) an einen Laptop gemeldet. Damit die Momentangeschwindigkeit des Fahrzeugs sowie dessen Position gemessen werden kann, wird ein GPS-Empfänger U-Blox AEK-4H SuperSense eingesetzt. Der GPS-Empfänger wird vor der Testreihe mit einem auf Normale der PTB rückführbaren Correvit-Sensor verglichen. Die Abweichung der Messwerte ist vernachlässigbar gering (Fehler  $f_{\text{Speed}} < 0,3\%$ , Fehler  $f_{\text{Weg}} < 0,5\%$ ). Durch die Protokollierung der Geschwindigkeit sollen mögliche Risikokompensationsstrategien



**Abbildung 14: Schematischer Aufbau zur Studie Fernlichtnutzung**

der Fahrer offengelegt werden. Dazu wird auch die jeweils gültige Höchstgeschwindigkeit protokolliert.

Für die Studie werden Fahrten auf drei Kursen durchgeführt. Dabei ist charakteristisches Merkmal aller Kurse, dass sie einen flachen Verlauf haben und außerdem genügend Vegetation am Seitenrand bieten, um die Fernlichtverteilung gut wahrnehmen zu können. Eine relativ gerade Streckenführung soll zu einem hohen Anreiz führen, das Fernlicht zu benutzen.

15 Personen haben an diesem Test teilgenommen. Das Alter der Probanden reicht von 26-55 Jahren. Alle Personen werden auf Normalsichtigkeit getestet und haben mindestens 5 Jahre Fahrerfahrung. Die Tests finden immer nach 22 Uhr statt, um völlige Dunkelheit zu gewährleisten.



**Abbildung 15: Teststrecken Übersicht**

Alle Teilnehmer des Tests müssen die jeweiligen Strecken zweimal befahren. Während der ersten Fahrt bekommen sie die Information, dass sie an der Erprobung neuer Fahrerassistenzsysteme teilnehmen

---

und daher ganz so fahren sollten, wie sie es gewohnt sind. Nach Testende würden ihnen dann einige Fragen gestellt. Diese Fahrt entspricht also einem Blindtest, wie häufig die Testpersonen die Fernlichtfunktion einsetzen würden. Vor der zweiten Fahrt wurden die Probanden aufgefordert, das Fernlicht so häufig wie möglich zu betätigen, auch wenn es absehbar ist, dass dieses nur für sehr kurze Zeit möglich sein würde.

### 3.2.2 Analyse

Während beider Fahrten wurden dieselben Parameter aufgezeichnet, wie oben beschrieben. Die Ergebnisse werden später statistisch ausgewertet. Für jeden Videoframe ist ein voller Parametersatz vorhanden. Für die Weiterverarbeitung der Daten ist keine kommerzielle Software vorhanden, weshalb hier ein selbst konzipiertes Programm zum Einsatz kommt, dass in der Programmiersprache C# geschrieben wurde.

Zunächst werden die Einschalt- und Ausschaltzeitpunkte bestimmt und die mit Abblend- und Fernlicht gefahrene Zeit und Strecke ermittelt.

Im nächsten Schritt werden die Fehler ermittelt, die während der Testfahrten auftraten. Prinzipiell gibt es zwei Fehlerarten, die unterschieden werden müssen:

Fehlertyp 1: Das Fernlicht wird eingesetzt, obwohl andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden könnten

Fehlertyp 2: Das Fernlicht wird nicht eingesetzt, obwohl niemand geblendet werden könnte

Der Fehlertyp 1 ist potenziell gefährlicher, da die vom Fernlicht ausgehende Blendung die Sehleistung von Verkehrsteilnehmer, insbesondere entgegenkommenden, stark herabsetzen kann. Der Fehlertyp zwei ist für andere motorisierte Verkehrsteilnehmer weniger gefährlich, allerdings verringert sich die Detektionsweite enorm. Ebenso wirkt sich das geringe Adaptationsniveau negativ auf die Sehleistung aus, so dass unbeleuchtete Hindernisse wie Fußgänger, Tiere oder andere Objekte erst zu spät erkannt werden. Der Vorteil durch ein Benutzen des Fernlichtes kann bei schlechten Sichtbedingungen (Wanne, nasse Fahrbahn, Blendung) bis zu 150 % betragen [36], was für eine erfolgreiche Notbremsung entscheidend ist.

Generelle Kennziffern, wie der Gesamtnutzungsgrad, werden ebenfalls ermittelt, um die Studien mit den vorangegangenen Arbeiten vergleichbar zu machen. Weitergehend werden aber auch Aussagen zu eventuell auftretenden Risikokompensationen möglich. Durch die aufgezeichneten Geschwindigkeitsdaten in Kombination mit den jeweils geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen ist es möglich nachzuvollziehen, ob und wie stark die Geschwindigkeit unter Fernlichtnutzung erhöht wird.

### 3.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse vorgestellt und interpretiert. Dabei wird zunächst auf die Kennziffern eingegangen, die auch in älteren Untersuchungen ermittelt und veröffentlicht wurden.

---

#### Durchschnittliche Fernlichtnutzung

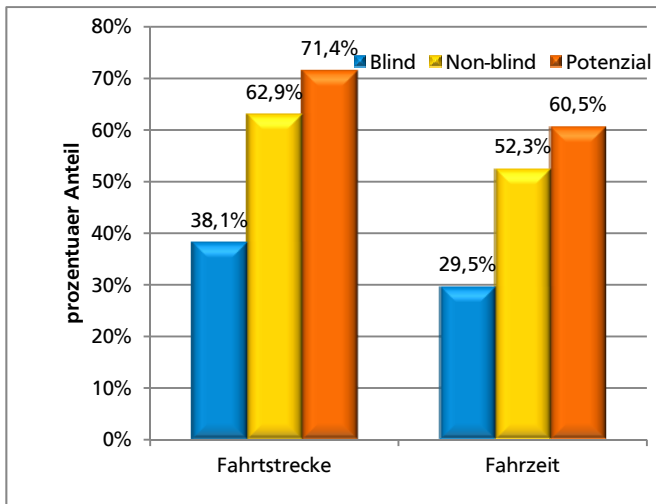
---

Die Untersuchungen finden alle auf einspurigen Land- bzw. Bundesstraßen statt, weshalb nicht ohne weiteres auf die totale Nutzungshäufigkeit und –dauer geschlossen werden kann. Das Landesamt für Statistik in Baden-Württemberg hat das Verkehrsaufkommen nach Straßenart über die letzten Jahrzehnte aufgeschlüsselt. Diese Daten lassen Rückschlüsse auf die Verteilung des Verkehrs auf Bundesautobahnen, Bundes- und Landstraßen und Stadtstraßen zu [74].

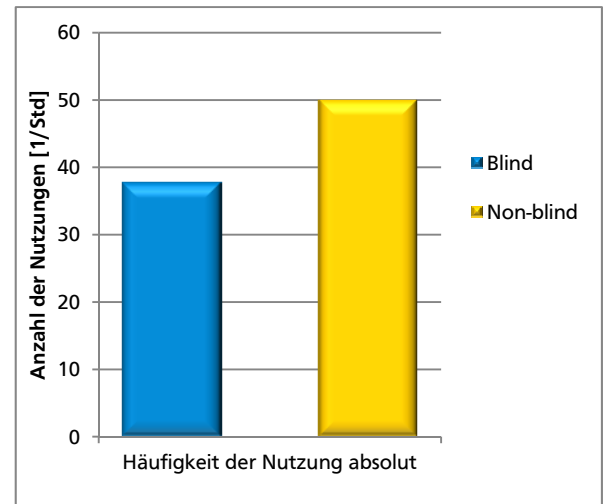
---

Während das Verkehrsaufkommen in den letzten 25 Jahren von 45,7 auf 79,3 Milliarden gefahrene Kilometer pro Jahr gestiegen ist, blieb die Verteilung des Verkehrs nahezu konstant. So entfallen 47,8 % der gefahrenen Strecke auf Bundes- und Landstraßen, während auf Autobahnen 21,8 % und auf Stadtstraßen 29,5 % der Fahrleistung erbracht werden.

Während der Vorversuche zu dieser Studie hat keiner der Probanden das Fernlicht auf Bundesautobahnen eingesetzt. Dies liegt vermutlich vornehmlich am auch nachts hohen Verkehrsaufkommen in den Ballungsräumen auf Autobahnen, hier mag es sicher regionale Unterschiede geben. An dieser Stelle wird mangels anderer Informationen davon ausgegangen, dass die Fernlichtnutzung auf



**Abbildung 16:** Anteil der Fernlichtnutzung auf Landstraßen



**Abbildung 17:** Erhöhung der Fernlichtnutzung bei Sensibilisierung der Autofahrer

Autobahnen derzeit vernachlässigbar gering ist.

Die Fernlichtnutzung in der Stadt ist in der Regel untersagt, da städtische Straßen im Normalfall durchgängig beleuchtet sind. Daher wird in der Folge davon ausgegangen, dass die Fernlichtnutzung praktisch nur auf Bundes- und Landstraßen begrenzt ist. Damit kann die Fernlichtnutzung, die in den Probandenversuchen ermittelt wird, auf die Fernlichtnutzung der Probanden insgesamt hochgerechnet werden.

Der durchschnittliche Anteil der mit Fernlicht gefahrenen Strecke ist in Abbildung 16 dargestellt. Im Falle des Blindtests (erste Fahrt) werden im Schnitt 38,1 % der Fahrtstrecke mit Fernlicht gefahren, was 29,5 % der gefahrenen Zeit entspricht. Diese Zahlen entsprechen in etwa den Ergebnissen der Untersuchung von Sullivan, wenn man bedenkt, dass die Fahrten alle nach 22 Uhr durchgeführt wurden, als die Verkehrsdichte zwischen 50 und 100 Fahrzeuge pro Stunde betrug.

Diese Zahlen ändern sich erwartungsgemäß dramatisch, wenn die Probanden während des Non-Blind-Tests die Aufgabe erhalten, die Fernlichtfunktion so häufig wie möglich zu nutzen. Dann steigt die Nutzungsdauer um 77 % auf nunmehr 52,3 % der Zeit. Ein Anteil von 62,9 % der gefahrenen Strecke wird nun unter Fernlicht befahren, was einer Steigerung um 65 % entspricht.

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch während des zweiten Testlaufes immer noch nicht zu allen Zeitpunkten Fernlicht genutzt wurde, zu denen dies möglich gewesen wäre. Der Nutzungsanteil könnte theoretisch noch um 14 % bezogen auf die Strecke bzw. 16 % bezogen auf die gefahrene Zeit erhöht werden. Auch wenn die Testpersonen für die Sichtweitenproblematik sensibilisiert wurden, lässt mit zunehmender Fahrtdauer die Konzentration auf die Aufgabe nach.

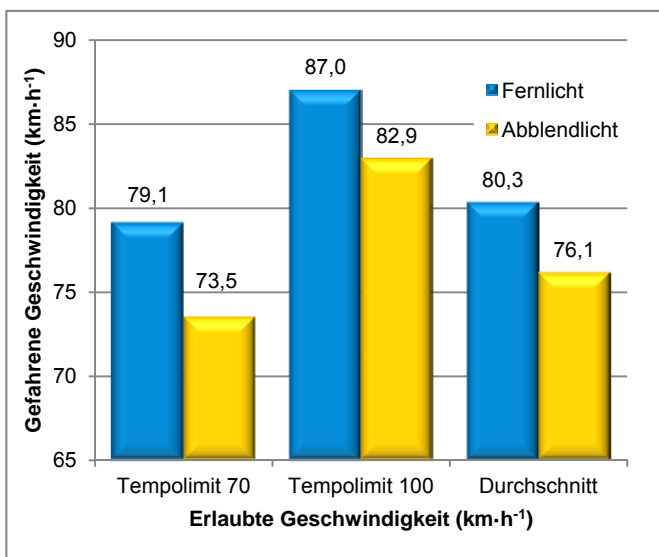


Überträgt man die Ergebnisse auf alle Straßenarten, so ergibt sich eine durchschnittliche Nutzung des Fernlichtes von 18,2 % der Fahrstrecke. Diese ließe sich unter Umständen durch ständige Sensibilisierung der Fahrer auf 30,0 % der Strecke steigern. Diese Zahlen zeigen, dass das Fernlicht zu wenig genutzt wird und eine Automatisierung dieser Funktion unbedingt geboten ist.

### Risikokompensation

An vielen Stellen der Literatur finden sich Hinweise auf die Tatsache, dass Fahrer einen Teil der durch eine bestimmte Maßnahme gewonnenen Sicherheit zugunsten einer erhöhten Geschwindigkeit wieder opfern. Für den konkreten Fall würde dies bedeuten, dass die Erhöhung der Detektionsweite zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit führt und damit die gewonnene Sicherheit zumindest teilweise wieder aufgeben. Dieser Effekt ist bekannt und unter anderem in [75] beschrieben.

In diesem Zusammenhang stellt sich stets die Frage, ob der Sicherheitsgewinn vollständig karnibalisiert wird, oder ob ein Nettozuwachs erhalten bleibt.



**Abbildung 18:** Risikokompensation der Autofahrer durch Erhöhung der Geschwindigkeit

Während der Fahrten zum Versuch wurden die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu allen Zeiten protokolliert. Da neben dem Beleuchtungszustand natürlich auch weitere Einflussgrößen entscheidend für die Anpassung der Geschwindigkeit sind (Fahrbahnzustand, Kurvenverlauf, Sichtbedingungen etc.) kann keine endgültige Aussage über die Gewichtung des Einflusses der einzelnen Parameter gemacht werden. Da allerdings während der Tests darauf geachtet wurde, dass alle Fahrten zwischen 22 und 23 Uhr stattfanden und trockene Bedingungen herrschten, können einige Einflussgrößen ausgeschlossen werden. Tempolimits sind sicherlich die wichtigsten

Orientierungsmerkmale für die Fahrer, weshalb für die Untersuchung auch die herrschenden Geschwindigkeitsvorschriften in Betracht gezogen wurden und die Durchschnittsgeschwindigkeiten für Streckenabschnitte mit 70 km·h<sup>-1</sup> und 100 km·h<sup>-1</sup> getrennt errechnet wurden. Ortslagen und Abschnitte mit durchgehender, ausreichender Beleuchtung wurden nicht in diese Untersuchung einbezogen.

Die Untersuchung ergab, dass alle Testpersonen bei Benutzung des Fernlichtes schneller fahren, als unter Abblendlichtbedingungen (s. Abbildung 18). Im Schnitt ergibt sich eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit von 76,1 auf 80,3 km·h<sup>-1</sup> (entspricht 5,5 %). Betrachtet man die Werte für die erlaubten Geschwindigkeiten getrennt, so ergibt sich, dass in 70-Zonen die Geschwindigkeit von durchschnittlich 73,5 auf 79,1 km·h<sup>-1</sup> (7,6 %) steigt. Analog gilt für 100-Zonen eine Erhöhung von 82,9 auf 87 km·h<sup>-1</sup> (4,9 %).

Um die Frage beantworten zu können, ob sich durch die Benutzung des Fernlichtes Sicherheitsvorteile gegenüber dem Abblendlicht ergeben, muss die Auswirkung der erhöhten Geschwindigkeit auf den Anhalteweg überprüft werden.

Vernachlässigt man Fahrwerksabhängigkeiten, so ergibt sich für den Anhalteweg  $s_{Anhalt}$  allgemein, dass er sich aus Bremsweg  $s_{Brems}$  und Reaktionsweg  $s_{Reak}$  additiv zusammensetzt.

$$S_{Anhalt} = S_{Reak} + S_{Brems}$$

Gl. 3-1

Geht man weiter davon aus, dass der Reaktionsweg linear von der Geschwindigkeit  $v_0$  abhängig ist und dass der Bremsweg in quadratischer Abhängigkeit von ihr steht, so ergibt sich folgende Gleichung.

$$S_{Anhalt} = t_{Reak} \cdot v_0 + \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{a_{Verz}}$$

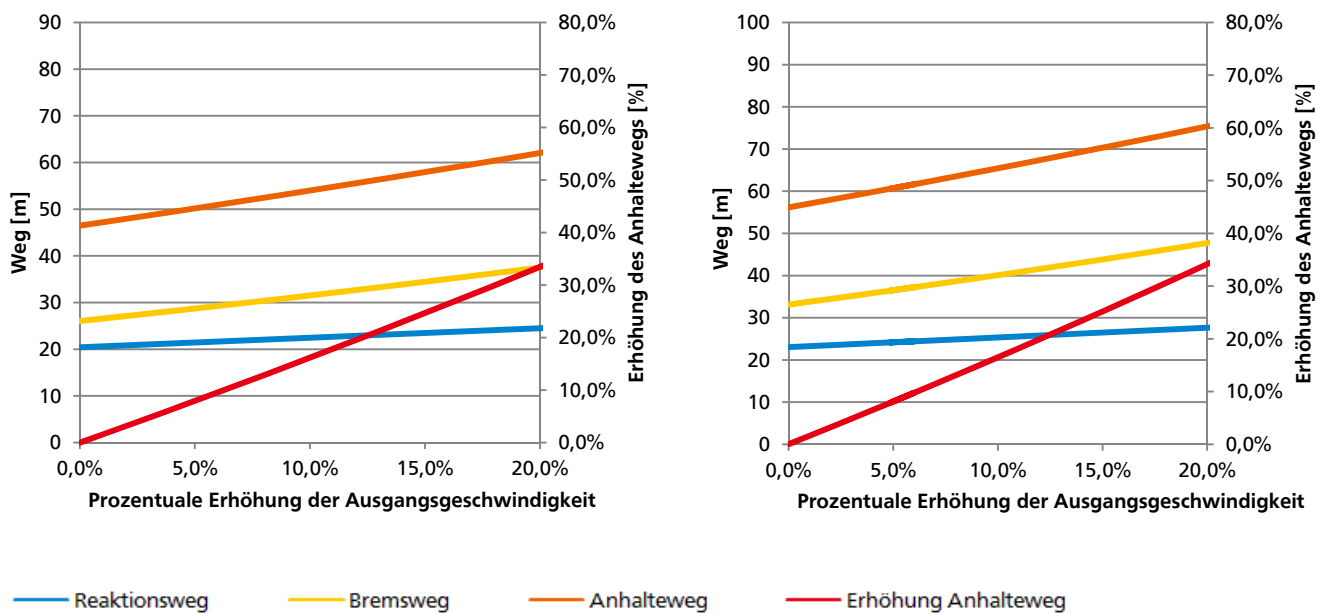
Gl. 3-2

wobei  $t_{Reak}$  für die Reaktionszeit und  $a_{Verz}$  für die Bremsverzögerung steht. Für die prozentuale Verlängerung  $k_{Anhalt}$  des Anhaltewegs bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit um  $k_v$  gilt dementsprechend

$$k_{Anhalt} = \left( \frac{2 \cdot t_{Reak} \cdot a_{Verz} (1 + k_v) + v_0 (1 + k_v)^2}{2 \cdot t_{Reak} \cdot a_{Verz} + v_0} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Gl. 3-3

In der Untersuchung ist festgestellt worden, dass sich die durchschnittliche Geschwindigkeit in 70- bzw. 100-Zonen um 7,6 % resp. 4,9 % erhöht. Nach Gl. 3-3 führen die gemessenen Erhöhungen der Geschwindigkeiten bei einer Reaktionszeit von 0,6 Sekunden zu den in Abbildung 19 dargestellten prozentualen Erhöhungen im Anhalteweg.



**Abbildung 19: Erhöhung des Anhaltewegs**  
Darstellung bei den Ausgangsgeschwindigkeiten 73,5 km·h<sup>-1</sup> bzw. 82,9 km·h<sup>-1</sup> (vgl. Abbildung 18), einer Verzögerung von 8 m·s<sup>-2</sup> und 1 s verlängerter nächtlicher Reaktionszeit

Somit ergibt sich für die ermittelten Erhöhungen der Geschwindigkeiten für die Tempo-70-Zonen eine Erhöhung des Anhaltewegs um 12,2 % und für die Tempo-100-Zonen um 7,9 %.

Der Erhöhung des Anhaltewegs muss die erhöhte Sichtweite unter Fernlicht entgegengehalten werden. Da die Sichtweite mit vielen Umgebungsparametern variiert, lässt sich über sie nur schwer eine allgemeingültige Aussage treffen. Allerdings existieren mehrere Veröffentlichungen über die Sichtweiten-erhöhung durch Fernlichtnutzung. Die Angaben über die Erhöhung reichen dabei von 50 % bis über 150 % (s. bspw. Anhang C).



Demnach ist es unerheblich, welcher Veröffentlichung man Glauben schenken möchte. Die erhöhte Detektionsweite ist immer ein Sicherheitsvorteil, der nicht durch die Geschwindigkeitszunahme ausgeglichen wird.

Nimmt man weiter die Ergebnisse einer Probandenbefragung während eines Sichtweiteversuches zur Hand, bei der die Personen danach befragt wurden, wie schnell man mit Abblendlicht fahren darf, so muss man feststellen, dass das Wissen um das Sichtfahrgebot nicht weit verbreitet ist. Stattdessen muss man davon ausgehen, dass sich die Mehrzahl der Autofahrer auch unter Abblendlicht an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für den betreffenden Streckenabschnitt orientieren wird. Damit ist sie aber in den allermeisten Fällen zu schnell, um innerhalb der einsehbaren Strecke anhalten zu können. Dies wird zwar ordnungsrechtlich nicht geahndet, wenn kein Dritter zu Schaden kommt. Es kann aber bei einem Unfall zivil- und strafrechtliche Bedeutung haben.

## Fehlbedienungen

Während der Benutzung des Fernlichtes kann es zu den schon beschriebenen Fehlbedienungen durch den Fahrer kommen. Da während der Versuche die Verkehrssituation mit aufgezeichnet und analysiert wurde, können diese Fehlbedienungen leicht analysiert werden. Die „verbotenen“ Zustände werden während der Datenanalyse einzeln inkl. ihrer Dauer und der zugehörigen Fahrstrecke ausgegeben.

**Tabelle 5: Häufigkeit der beiden Fehlertypen pro Stunde**

Durchlauf	Fehlertyp 1	Fehlertyp 2
Blindtest	10,7 h <sup>-1</sup>	32,9 h <sup>-1</sup>
Non-Blindtest	19,9 h <sup>-1</sup>	44,8 h <sup>-1</sup>

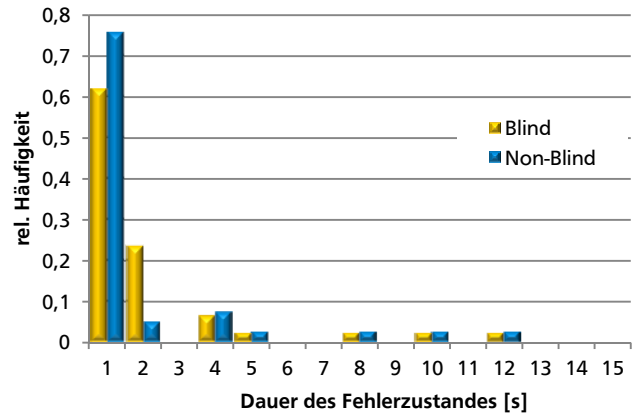
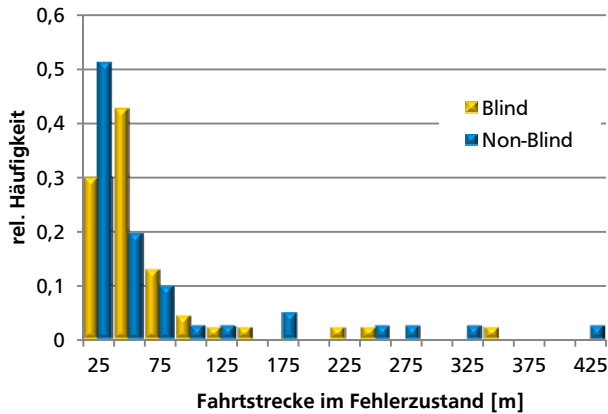
Bei der Interpretation der Tabelle 5 stellt man zunächst fest, dass sich die Anzahl der Fehlbedienungen im Non-Blindtest erhöht. Dies mutet zunächst widersprüchlich an, ist aber durchaus schlüssig zu erklären. Der Fehlertyp 1 kann grundsätzlich nur auftreten, wenn die Fernlichtfunktion auch genutzt wird. Da dies während des Blindtests nur in 29,5 % der Zeit der Fall war, gegenüber 52,3 % während des Non-Blindtests ist die Wahrscheinlichkeit einer Fehlbedienung naturgemäß wesentlich geringer.

**Tabelle 6: Häufigkeit der beiden Fehlertypen pro Stunde ohne Fehlerzustände unter 2 s**

Durchlauf	Fehlertyp 1	Fehlertyp 2
Blindtest	1,6 h <sup>-1</sup>	23,5 h <sup>-1</sup>
Non-Blindtest	3,9 h <sup>-1</sup>	22,9 h <sup>-1</sup>

Außerdem werden in Tabelle 5 auch Fehlerzustände von geringer Dauer erfasst, die man auch als Reaktionszeit werten könnte. Ändert man die Bewertung derart, dass nur Fehler mit einer Dauer von mehr als 2 Sekunden als wirkliche „verbotene“ Zustände gezählt werden, so ergeben sich die Werte, wie sie in Tabelle 6 dargestellt sind. Bedenkt man nun, dass das Fernlicht während des Nicht-Blindtests eine etwa 77% höhere Einschaltdauer aufweist, so liegt auch die erhöhte Rate des Fehlertyp 1 innerhalb der erwarteten Streuung. Die Rate des Fehlertyps 2 liegt sogar deutlich unter der des Blindtests.

Aussagekräftiger als die absoluten Fehlerraten sind die Verteilungen der Fehlerhäufigkeiten über deren Dauer bzw. der im Fehlerzustand zurückgelegten Fahrstrecke. Für den Fehlertyp 1 sind diese Verteilungen der Abbildung 20 zu entnehmen. Dargestellt ist der Anteil der auftretenden Fehler über der Fehlerdauer bzw. der im Fehlerzustand gefahrenen Strecke. Den Abbildungen lässt sich entnehmen, dass durch die Sensibilisierung der Fahrteilnehmer eine erhöhte Aufmerksamkeit bewirkt wird. Die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht sich somit und bei Erscheinen von Gegenverkehr wird schneller abgeblendet. Aus der Grafik lässt sich entnehmen, dass etwa ein Drittel aller Abblendvorgänge im Blindversuch länger als 1 Sekunde dauern. Zumindest dieser Anteil könnte durch eine adaptive Fernlichtsteuerung vermieden werden, ohne dass die eigene Sichtweite darunter leidet.



**Abbildung 20:** Verteilung des Fehlertyps 1 in Abhängigkeit von der Fehlerdauer (rechts) und der während des Fehlerzustandes gefahrenen Strecke (links)

Die Häufigkeitsverteilungen können durch eine Exponentialverteilung approximiert werden. Dabei gilt für die absolute Häufigkeit der einzelnen Merkmale

$$h(x) = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda x}$$

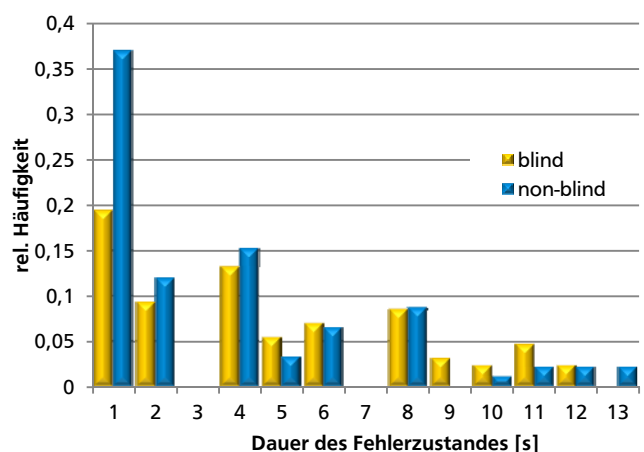
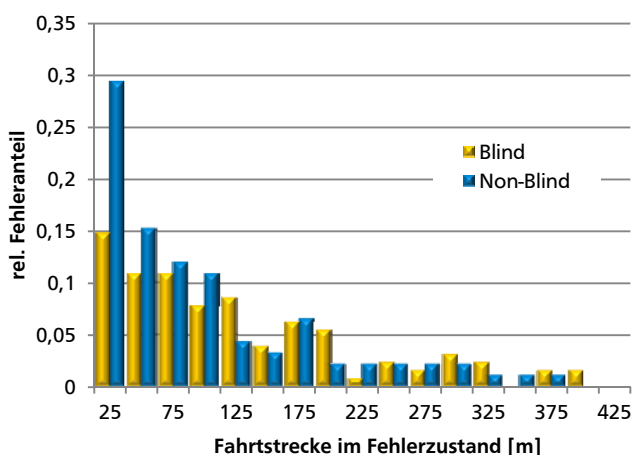
Gl. 3-4

wobei sich für die beiden Versuchsdurchläufe verschiedene Parameter  $\lambda$  errechnen lassen. Dieselben Überlegungen gelten auch für den Fehlertyp 2. Die Reaktionszeiten verringern sich auch hier signifikant. Die Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 21 dargestellt. Auch hier kann eine exponentielle Abhängigkeit unterstellt werden. Die Parameter dieser Verteilungen wurden ebenfalls mit der Statistiksoftware SPSS untersucht und in der Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7:** Parameter  $\lambda$  der Verteilungen für die Auswertung nach Strecke bzw. Fehlerdauer

Durchlauf	Strecke	Fehlerdauer
Blindtest	-0,006	-0,127
Non-Blindtest	-0,009	-0,286

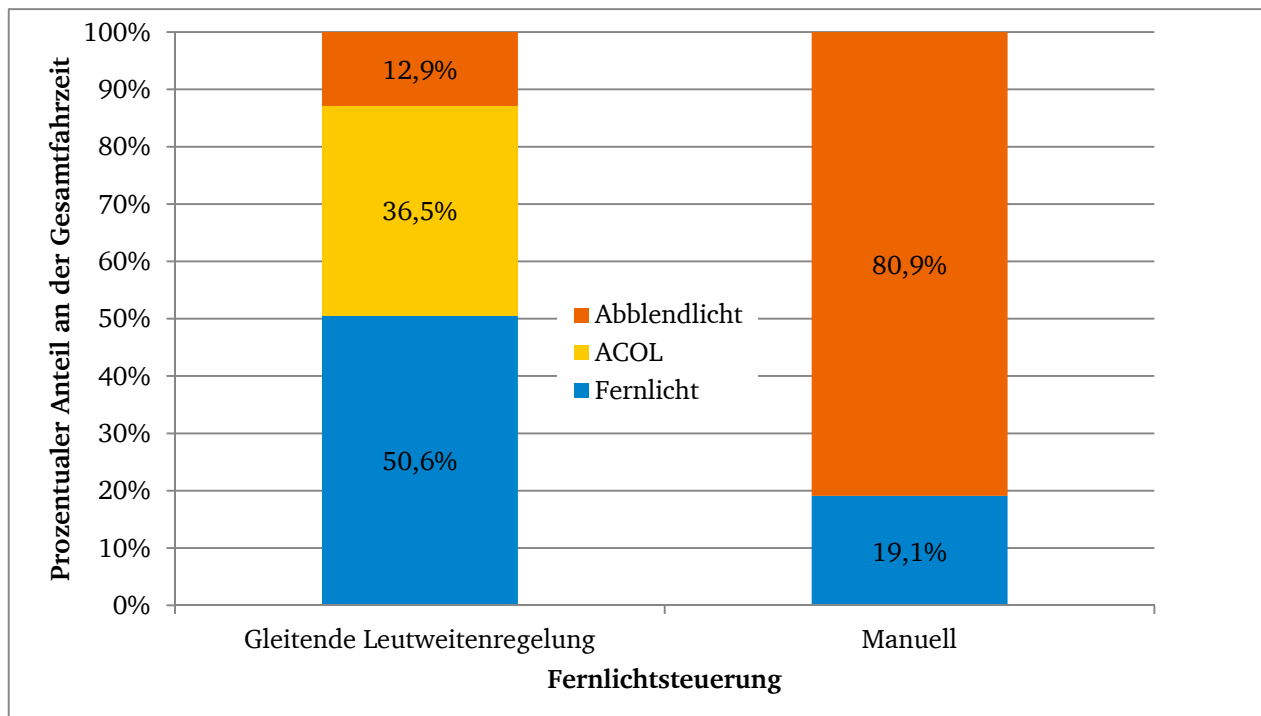
Beachtet werden muss jedoch, dass diese Ergebnisse erzielt wurden, in dem der Zeitpunkt des Erscheinens von Gegenverkehr im Videobild als frühest möglichen Erkennenszeitpunkt angenommen wurde. Es wurden keine Vergleiche mit den Entfernungen gezogen, die laut anderer Untersuchungen als Mindestabblendentfernung ausreichend sind (vgl. z.B.[76]).



**Abbildung 21:** Verteilung des Fehlertyps 2 in Abhängigkeit von der Fehlerdauer (rechts) und der während des Fehlerzustandes gefahrenen Strecke (links)

### 3.3 Nachfolgende Untersuchungen

BÖHM [77] untersuchte im Nachgang zu der im vorigen Abschnitt dargestellten, eigenen Studie wie



**Abbildung 22:** handgesteuertes VarioX-Modul, eingesetzt während statischer Sichtweitenversuche, Bild: Böhm (L-Lab, Universität Paderborn)

groß der Vorteil einer adaptiven Regelung tatsächlich ist. Dazu nutzte er ein vorhandenes Testsystem zur gleitenden Leuchtweite („Adaptive cut-off line – ACOL“). Die Testpersonen, die nicht über den Inhalt des Tests aufgeklärt wurden, fuhren dabei über unbeleuchtete Landstraßen und ihr Bedienverhalten des Fernlichtes wurde protokolliert. Gleichzeitig wurde das ACOL-Testsystem betrieben und dessen Entscheidungen in denselben Verkehrssituationen aufgezeichnet. Als Ergebnis können die Entscheidungen des Testsystems dem Verhalten der Testpersonen gegenüber gestellt werden.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse in Abbildung 22 zeigt deutlich, dass das automatische System zu einer wesentlich höheren Einschaltdauer des Fernlichtes führt (50,6 % der Fahrzeit). Zusätzlich ist in 36,5 % der Zeit die adaptive Leuchtweitenregelung aktiv, was einen zusätzlichen Gewinn an Sichtweite bedeutet, denn mit einer konventionellen Fernlicht/Abblendlicht-Konfiguration hätte hier mit Abblendlicht gefahren werden müssen. In nur 12,9 % der gefahrenen Zeit wäre das Abblendlicht alleine aktiv gewesen. Im Vergleich dazu hatten die Testfahrer in nur 19,1 % aller Fälle das Fernlicht eingeschaltet.

Weiterhin konnte in der Studie festgestellt werden, dass 4 von 20 Personen das Fernlicht gar nicht benutzt haben. Von den 16 Personen, die das Fernlicht nutzten, haben 11 mindestens einmal und bis zu dreimal das Abblenden vergessen. Diese Ergebnisse bestätigen das Resultat der eigenen Untersuchungen.

Leider wird in der Studie von BÖHM nicht darauf eingegangen, wie häufig das automatische System Fehler begangen hat. Eine manuelle Auswertung der Leistung des Systems über den Vergleich mit Videoaufnahmen wie in der eigenen Untersuchung hätte somit der menschlichen Leistung erstmals gegenübergestellt werden können. Bis heute fehlen hierzu unabhängig erhobene Daten. Zudem lässt

---

das Fehlen einer Angabe zu den Fehlerzuständen ein direktes Vergleichen der Performance zwischen Mensch und automatischem System fragwürdig erscheinen, wenn nicht überprüft wird, ob das System Fernlicht nur in erlaubten Zuständen einschaltet.

### **3.4 Zusammenfassung Fahrerverhalten**

Die Fernlichtfunktion ist deutlich untergenutzt. Der Anteil der mit Fernlicht gefahrenen Kilometer bzw. Zeit liegt in der eigenen Studie bei 38,1% bzw. 29,5%. Für die während der Versuche herrschenden Verkehrsdichten von 50 bis 100 Fahrzeugen pro Stunde entspricht dies in etwa den Ergebnissen von Sullivan. BÖHM ermittelt sogar noch niedrige Werte in seiner Studie. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die Fernlichtnutzung durch Verwendung automatischer Fernlichtsysteme etwa verdoppelt werden könnte.

Die Geschwindigkeit während der Fernlichtnutzung steigt leicht an (4,9% bis 7,6%). Diese leichte Erhöhung kann jedoch den Sicherheitsgewinn durch die gesteigerte Sichtweite nicht aufwiegen, so dass eine Verringerung der Unfallzahlen zu erwarten ist.

Ein Vergleich mit der zweiten UMTRI-Studie hinsichtlich Nutzungsdauer und –zeit sowie Geschwindigkeit wäre hilfreich, jedoch konnten die Daten auch auf Anfrage nicht von UMTRI zur Verfügung gestellt werden. Die Rohdaten wurden hinsichtlich dieser Kriterien nicht ausgewertet.

---

## 4 Versuch Sichtweitenvergleich adaptive Fernlichtsysteme

Die Versuche zur Nutzung des Fernlichtes zeigen zwar das enorme Potenzial von automatischen Fernlichtsystemen zur Nutzungsoptimierung des Fernlichtes auf, jedoch könnten die menschlichen Fehler schon durch einfache Fernlichtassistenten ausgeglichen werden. Adaptive Fernlichtsysteme (ADB) lassen durch die anpassbaren Lichtverteilungen weiteres Potenzial vermuten. Die in diesem Kapitel beschriebene Studie soll daher Aussagen dazu liefern, wie groß ein Sichtweitevorteil der verschiedenen ADB gegenüber der einfachen Fernlichtfunktion, sei sie automatisch gesteuert oder manuell bedient, ausfällt. Zu beachten gilt es, dass jede Messung nur im dynamischen Verkehr sinnvoll ist, da die Regelung der Leuchtweite natürlich nur in diesem Fall sinnvoll ist. Statische Versuche kommen daher als Untersuchungsmethode nicht infrage.

### 4.1 Bisherige Forschung

Wenige Studien haben sich bisher auf die zu erwartenden Detektionsweitevorteile adaptiver Fernlichtsysteme konzentriert, was vermutlich vor allem am Fehlen von Systemen im Serieneinsatz liegt. Am ehesten erfüllen noch die Untersuchungen CIELERS [78] zur Verbesserung der Detektionsleistung von Kraftfahrern aufgrund der Verwendung von AFS-Systemen die Kriterien, die an einen entsprechenden Test gestellt werden müssten. CIELER lässt Probanden in einem Auto mit Halogen-AFS einen Testparcours abfahren und misst die Verbesserung ihrer Detektionsleistung gegenüber einer Kontrollgruppe in einem Fahrzeug ohne AFS-Funktion. Ebenso werden wie im vorhergehenden Kapitel die Geschwindigkeit der Fahrzeuge und zusätzlich die Güte der Querverführung überprüft.

Das Ergebnis ist eine deutlich erhöhte Detektionsleistung insbesondere bei schwer erkennbaren Sehzielen. Die Güte der Querverführung wird kaum beeinflusst während die Durchschnittsgeschwindigkeit leicht zunimmt. Wie die Untersuchung von GRIMM & CASENAVE [79] beschäftigt sich die Studie nur mit dem klassischen AFS-System und noch nicht mit adaptiven Fernlichtsystemen.

Forschungen auf diesem Gebiet sind von Michael Böhm am L-Lab der Universität Paderborn durchgeführt worden. Allerdings beschränkte sich Böhm auf die Untersuchung des statischen Falles [80]. Die Untersuchungen fanden im Lichttunnel der Firma Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, statt. Die Probanden sitzen daher auch nicht in einem Auto, sondern auf Bänken hinter einem Scheinwerferrack, auf dem ein VarioX-Scheinwerferpaar montiert ist, welches nicht automatisch arbeitet, sondern manuell eingestellt werden muss.

Da gleichzeitig 10 Personen getestet wurden, ist nicht gewährleistet, dass alle Probanden in Fahrerposition oder zumindest Beifahrerposition sitzen. Es ist in der Veröffentlichung nicht beschrieben, wie lange die Testpersonen Zeit haben, um das Sichtziel zu erkennen. In den zwei Testdurchläufen werden vorausfahrende und entgegenkommende Verkehrsteilnehmer durch Rückleuchten bzw. Scheinwerfer simuliert.

Das Sichtziel besteht aus einem Fußgänger, welcher den Probanden in Meterschritten entgegenläuft. Nach jedem Meter müssen die Testpersonen entscheiden, ob sie die dunkel gekleidete Person (im Mittel 16% Reflektionsgrad) sehen oder nicht und dies durch Drücken eines entsprechenden Knopfes signalisieren. Insgesamt nehmen 45 erfahrene Autofahrer an diesem Test teil.

Die Ergebnisse zeigen wie zu erwarten, dass die gleitende Leuchtweite einen erheblichen Sichtweitevorteil bietet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Mit  $s$  ist die statistische Streuung der Erkennbarkeitsweiten angegeben. Es ist allein aus diesen Werten erkennbar, dass die Sichtweiten unter den unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien statistisch signifikant unterschiedlich sind.

Interpretiert man die Resultate, so fällt als erstes auf, dass die Werte für vorausfahrenden Verkehr paradoxerweise geringer sind, als für entgegenkommenden Verkehr, der ja durch seine Blendung eigentlich hinderlich sein sollte. Zu erklären ist dies dadurch, dass der Fußgänger in Fall des vorausfahrenden Verkehrs auf der linken Seite entgegenkommt, im Fall des Entgegenkommenden aber auf der rechten Seite. Durch die Asymmetrie der Lichtverteilung kommt es daher zu diesem Phänomen.

Da Fußgänger jedoch in aller Regel am rechten Fahrbahnrand für die Unfallvermeidung relevant sind, sind die Ergebnisse zumindest für den vorausfahrenden Verkehr kritisch zu hinterfragen. Weitere Probleme ergeben sich aus der fehlenden Fahraufgabe. Durch die statische Versuchsanordnung kann die adaptive und somit dynamisch regelnde Lichtverteilung ebenfalls nicht nachgeahmt werden.

Der Vergleich zwischen Abblendlicht und variabler Fernlichtverteilung lässt außerdem die Tatsache außer Acht, dass einige Testpersonen die Fernlichtfunktion überhaupt nicht oder nur wenig nutzen und somit im Falle fehlender anderer Verkehrsteilnehmer extreme Nachteile haben.

Um den Zusatznutzen von adaptiven Systemen quantifizieren zu können, müssen weitere Versuche unter kontrollierbaren, aber dynamischen Bedingungen stattfinden. Der Versuch Cielers ist hierfür ein gutes Beispiel.

**Tabelle 8: Sichtweitevorteile durch GLW nach Böhm**

Entgegenkommender Verkehr

Low beam	GLW
104.2 m ( $s = 6.9$ )	134.6 m ( $s = 6.1$ )

Vorausfahrender Verkehr

Low beam	GLW
94.8 m ( $s = 7.9$ )	124.8 m ( $s = 9.5$ )

## 4.2 Eigene Untersuchungen

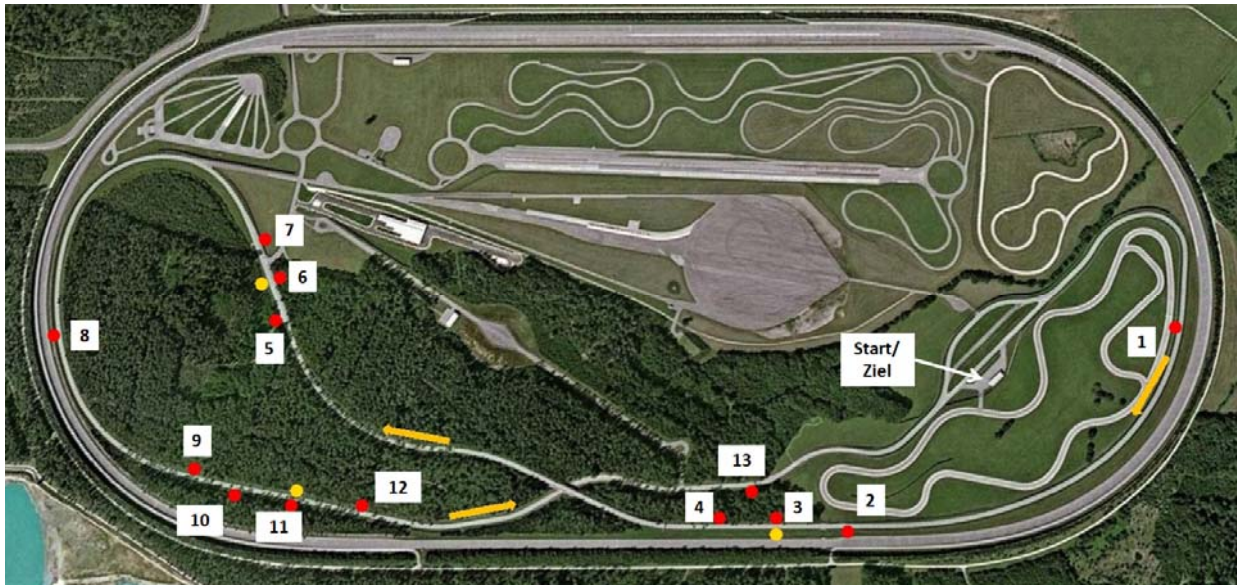
Um einen Versuch dieser Komplexität durchführen zu können, bedarf es erheblichen personellen Aufwands und nicht zuletzt einer der Öffentlichkeit unzugänglichen Versuchsanlage. Daher wurde dieser Versuch in Zusammenarbeit mit Herrn Benjamin Hummel (AUDI AG) als Vergleichsversuch zwischen den Systemen „Gleitende Leuchtweite“, „maskiertes Dauerfernlicht“ und „MatrixBeam“ angelegt. Auf die technische Beschreibung der verschiedenen Systeme wird an dieser Stelle verzichtet, der geneigte Leser findet sie beispielsweise in [81] oder [82] ausführlich beschrieben.

### 4.2.1 Versuchsaufbau

Die Versuche finden auf der Versuchsstrecke „Handling 1“ des AUDI Testgeländes statt. Dies garantiert eine wiederholbare, störungsfreie Durchführung der Versuche. Der fehlende Gegenverkehr wird dabei durch drei aufgestellte Scheinwerferracks simuliert. Es werden dabei alle drei derzeit verfügbaren Lichtquellen Halogen, HID und LED genutzt. Die Quellen werden an den drei längeren Geraden der Handlingstrecke aufgestellt, um die Auswirkungen der adaptiven Fernlichtsysteme auf die Detektionsweite messen zu können (s. Abbildung 23).



Die Fahrer haben die Aufgabe, bei Detektion eines Sichtzieles einen Knopf zu drücken, den sie während der Fahrt in rechten Hand halten. In jedem Wagen sitzt ein Testleiter auf dessen Rechner bei diesem Signal die zurückgelegte Wegstrecke protokolliert. Aus den Differenzen dieser Wegstrecke zu den vorher vermessenen Positionen der Sichtziele lassen sich die Detektionsentfernungen berechnen. Da die verschiedenen Systeme den Gegenverkehr zwar alle automatisch erkennen, jedoch die Lichtverteilung unterschiedlich modulieren, um den Entgegenkommenden zu entblenden, sollten sich auch unterschiedliche Detektionsentfernungen für alle Systeme ergeben. Die Frage, die bei diesem Versuch geklärt werden soll, ist, wie groß diese Unterschiede bei einer realistischen Fahraufgabe tatsächlich sind.



**Abbildung 23:** Übersicht über den Testparcours  
Rote Punkte markieren Sichtziele, gelbe Punkte Scheinwerferracks. Die orangenen Pfeile geben die Fahrtrichtung an. Die Strecke ist 4516 m lang (Foto: Google).

Die Verteilung der Sichtziele hat den Schwerpunkt in der Nähe der Blendquellen. Nur drei Ziele sind auf anderen Stellen der Strecke verteilt. Dies ist dem Untersuchungszweck geschuldet, da gerade die unterschiedlichen Potenziale in Gegenverkehrssituationen bewertet werden sollen.

Nach den jeweiligen Testfahrten müssen die Versuchsteilnehmer einen Fragebogen ausfüllen, in dem sie das gerade erlebte System und deren Funktionsweise subjektiv beurteilen können. Diese Befragung hat zum einen den Zweck, die zu erwartende Kundenakzeptanz zu bewerten, zum anderen können aber auch Angaben zur persönlichen Fernlichtnutzung und deren Bedeutung für die Fahrsicherheit gemacht werden.

Alle Testfahrzeuge sind neben den Fahrzeugrechnern, die zum Betrieb der Fernlichtsysteme notwendig sind, mit einem weiteren Laptop ausgestattet, der an den CAN-Bus der Fahrzeuge angeschlossen ist. Außerdem wird über die serielle Schnittstelle der Zustand des Tasters eingelesen, der von den Testpersonen bei Detektion eines Sichtzieles gedrückt wird. Über die Summation des aus dem CAN-Signal ermittelten Weges kann zu jedem Auslösen des Tasters die zugehörige gefahrene Wegstrecke protokolliert werden.

Um Streuungen der Wegmessung zu vermeiden, werden die Wegmesser zu Beginn jeder Fahrt zurückgesetzt. Zusätzlich sind auf der Teststrecke Lichtschranken installiert, deren genauer Ort bekannt ist und welche über einen am Laptop angeschlossenen IR-Sensor ebenfalls eine Aufzeichnung der Wegstrecke auslösen. Kommt es während der Fahrt zu Unterschieden in den zurückgelegten Wegstrecken

---

der einzelnen Testpersonen, etwa durch „Kurvenschneiden“, so kann dies bei der Auswertung erkannt und der Fehler herausgerechnet werden.

Die Sichtziele bestehen aus verschiedenförmigen homogen grau gestrichenen Sperrholztafeln mit einem Reflektionsgrad von etwa 16%. Dieser Reflektionsgrad ist typisch für hellen Jeansstoff. Verwendet werden zum einen Quadrate mit 40 cm Kantenlänge, zum anderen auch personenförmige Tafeln in zwei Größen (erwachsene Frau und Kind).

Insgesamt nehmen 29 Personen an dem Test teil, deren Alter zwischen 21 und 40 Jahren liegt. Es beteiligen sich zehn Frauen und 19 Männer, von dieser Gesamtheit tragen 15 Personen eine Sehhilfe, ein Mann ist farbfahlsichtig. Alle Personen haben seit mindestens drei Jahren den Führerschein, nur eine Person gibt an eher selten Auto zu fahren. Da die Probanden sich freiwillig zu dem Test meldeten, steht zu vermuten, dass die Probanden technikaffin sind.

## 4.2.2 Testsysteme

Als Testsysteme sind fünf Fahrzeuge im Einsatz. Dabei handelt es sich um zwei Wagen mit manueller Fernlichtschaltung („Normal 1“ und „Normal 2“), einen mit gleitender Leuchtweite (GLW), ein Auto mit maskiertem Dauerfernlicht (MDF) und ein Fahrzeug, welches mit einem LED-Matrix Beam (MB) ausgerüstet ist. Alle Testfahrzeuge sind vom Typ A8 und sind bis auf die LED-Matrix mit Xenon-Systemen ausgestattet.

## 4.2.3 Einflussfaktoren

Praktische, insbesondere dynamische Probandenversuche weisen häufig eine starke Streuung in den Ergebnissen auf. Diese Streuungen kommen zum einen durch die unterschiedlichen körperlichen Voraussetzungen der Subjekte zustande.

Im vorliegenden Fall führt allerdings auch die Fahrbahnbeschaffenheit der Handlingstrecke zu Problemen, die definierte Welligkeiten realer Straßendecken simulieren soll. Besonders im Bereich der ersten Blendquelle (Halogenscheinwerfer) sind hochfrequente periodische Fahrbahnunebenheiten (Zitterstuckern) vorhanden, welche die Karosserien der Testfahrzeuge bei der Testgeschwindigkeit von 80 km/h derart in Schwingung versetzen, dass die adaptiven Fernlichtsysteme nicht in der Lage sind, die Hell-Dunkel-Grenzen bzw. die Fernlichtsektoren so schnell nach zu regeln, dass sich diese Karosseriebewegungen nicht in der Leuchtweite niederschlagen. Wie sich erst während der Auswertung zeigte, sind unter diesen Bedingungen valide Ergebnisse zu Detektionsweiten nicht möglich. Daher werden die drei Sichtziele im Bereich des ersten Scheinwerferracks nicht in die Auswertung einbezogen.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Testpersonen, die an einem Abend alle Testsysteme fahren müssen, mit jeder gefahrenen Runde die Streckenführung und damit auch die Positionen der Sichtziele besser in Erinnerung haben. Es stellt sich ein Lerneffekt ein, der zur Folge hat, dass die Testpersonen, die Sichtziele nicht mehr detektieren müssen, sondern deren ungefähre Position bereits kennen. Den Ergebnissen der zweiten bis vierten Testfahrt kann also nicht uneingeschränkt vertraut werden.



## 4.2.4 Ergebnisse

Hier sollen die wichtigsten Resultate vorgestellt und weiter interpretiert werden. Unter etwas anderen Gesichtspunkten wurde auch durch JOBSTVOGT eine Auswertung [82] beschrieben. Einige seiner Befunde werden auch hier diskutiert.

Zunächst ist festzustellen, dass alle Sichtziele mit einer Rate von über 90% erkannt wurden. Die geringsten Erkennungsraten ergeben sich für linksstehende Sichtziele. Dies hängt wahrscheinlich mit der Erwartungshaltung der Testpersonen zusammen, die Ziele vorwiegend auf der rechten Seite vermuteten. Hinzu kommt die asymmetrische Lichtverteilung der Systeme.

Der Test auf Normalverteilung der Sichtweiten für die einzelnen Sichtziele fällt uneinheitlich aus. Während die Detektionsentfernung bei den Tests unter Verwendung des MatrixBeam bis auf eine Ausnahme normalverteilt sind, gilt dies für alle anderen Testsysteme nur sehr eingeschränkt. Auch die Tests für die beiden verwendeten „normalen“ Fahrzeuge, also mit manueller Fernlichtbedienung, ergeben ein uneinheitliches Bild (vgl. Tabelle 9).

**Tabelle 9: Ergebnisse des Tests der gemessenen Detektionsentfernungen auf Normalverteilung mit den verschiedenen Testsystemen bei einem Signifikanzniveau von  $p=0,05$**

Nr.	Beschreibung	System MB	MDF	GLW	Normal 1	Normal 2
1	Dummy groß Rechts	ja	nein	nein	ja	ja
2	Quadrat Rechts	ja	nein	nein	ja	ja
3	Dummy groß Rechts + Halogen-SW-Rack	ja	ja	ja	ja	nein
4	Dummy klein Rechts	ja	nein	nein	ja	ja
5	Quadrat Links	ja	ja	ja	ja	ja
6	Dummy groß Rechts + Xenon-SW-Rack	ja	nein	ja	nein	ja
7	Dummy klein Rechts	ja	ja	ja	ja	ja
8	Dummy groß Rechts	ja	ja	ja	nein	nein
9	Quadrat links	nein	nein		ja	ja
10	Dummy groß Rechts + LED-SW-Rack	ja	ja	ja	ja	nein
11	Dummy klein Rechts	ja	nein	nein	nein	nein
12	Quadrat links	ja	ja	nein	ja	ja
13	Quadrat rechts	ja	ja	ja	ja	ja

Wie der Tabelle zu entnehmen gibt es außer für das System MatrixBeam (MB) keine durchgängig normalverteilten Detektionsentfernungen. Dementsprechend sind einfache statistische Methoden auf die ermittelten Werte nicht anzuwenden. Dennoch soll an dieser Stelle ein Überblick über die durchschnittlichen Entfernungen und den auftretenden statistischen Streuungen gegeben werden.

Vergleicht man die gemessenen mittleren Detektionsentfernungen, so lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, welches System die größten Vorteile bietet. An verschiedenen Sichtzeichen ergeben sich die optimalen Sichtweiten für unterschiedliche Systeme. Wenn man nun noch die hohen Streuungsparameter in die Betrachtung mit einfließen lässt, so ergibt ein uneinheitliches Bild.

Ein statistisch signifikanter Unterschied ist für kein Sichtziel nachweisbar. Signifikant ist lediglich, dass das manuell bediente System 1 am schlechtesten abschneidet. Dies ist auch leicht nachvollziehbar, da

**Tabelle 10: Mittelwerte und Streuungen der Detektionsentfernungen für alle verwendeten Systeme an den verschiedenen Sichtzielen**

Ziel Nr.	mittlere Detektionsentfernungen [m]					Statistische Streuung				
	MB	MDF	GLW	Normal 1	Normal 2	MB	MDF	GLW	Normal 1	Normal 2
1	100,7	103,9	111,1	103,1	90,1	10,5	15,3	30,9	12,5	13,6
2	65,3	69,8	79,0	65,1	71,0	32,8	23,6	31,1	21,3	22,9
3	56,2	69,5	70,7	41,8	77,2	12,3	21,0	21,6	29,5	18,1
4	75,0	78,6	92,9	56,3	71,0	11,4	18,3	32,9	21,1	17,8
5	74,9	88,9	76,5	71,7	80,5	28,8	30,2	32,7	25,9	25,6
6	84,7	73,7	68,9	43,7	89,4	16,2	24,6	22,0	28,6	22,3
7	86,6	94,4	75,0	51,1	76,4	14,3	26,3	13,9	25,8	23,3
8	89,2	94,3	92,8	97,1	88,0	16,4	20,5	12,9	15,4	16,4
9	51,0	60,8	48,9	36,7	59,1	25,2	26,5	16,4	16,4	10,1
10	84,8	96,0	73,1	41,2	83,5	20,5	21,0	11,1	27,2	9,0
11	84,9	90,0	74,6	54,7	66,8	11,8	27,5	16,2	22,4	12,9
12	67,5	66,2	57,7	60,5	50,5	18,5	24,3	17,0	32,2	15,8
13	88,4	93,2	89,5	84,8	90,1	10,5	22,7	16,6	20,0	19,5

es sich um ein System mit symmetrischer Lichtverteilung handelt, welches keinen Anstieg der Hell-Dunkel-Grenze am rechten Fahrbahnrand aufweist. In die Nähe der Detektionsentfernungen der

**Tabelle 11: Ergebnisse des Tests der gemessenen Detektionsentfernungen auf Normalverteilung mit den verschiedenen Testsystemen bei einem Signifikanzniveau von  $p=0,05$**

Sichtziel Nr.	Rangfolge der Systeme				
	MB	MDF	GLW	Normal 1	Normal 2
1	4	2	1	3	5
2	4	3	1	5	2
3	4	3	2	5	1
4	3	2	1	5	4
5	4	1	3	5	2
6	2	3	4	5	1
7	2	1	4	5	3
8	4	2	3	1	5
9	3	1	4	5	2
10	2	1	4	5	3
11	2	1	3	5	4
12	1	2	4	3	5
13	4	1	3	5	2
Rangsummen	39	23	37	57	39

anderen Systeme kommt dieses Fahrzeug daher nur in den Streckenabschnitten, in denen aufgrund fehlenden Gegenverkehrs mit vollem Fernlicht gefahren werden kann. Dies ist bei den Sichtzeichen Nr. 1, 8, und 13 der Fall.

Verzichtet man auf die Information, wie groß der Vorteil der einzelnen Systeme letztlich ist und gibt sich mit einer Rangfolge zufrieden, so kann man für die einzelnen Sichtzeichen Rangfolgen der Systemperformance anhand der durchschnittlichen Detektionssichtweite bilden. Danach kann anhand der Rangsumme entschieden werden, ob einzelne Systeme besser oder schlechter als der Durchschnitt abschneiden.

Da die Detektionsentfernungen aufgrund des Testdesigns für jedes Sichtzeichen stark unterschiedlich sind, machen Vergleiche der Rangsummen, etwa nach Kolmogorov-Smirnov, keinen Sinn. Man kann aber die

---

Rangfolge der Systemperformance für jedes einzelne Sichtziel ermitteln. Die Summation der einzelnen Ränge könnte weiteren Aufschluss über die Systemleistung geben. Diese Rangfolgentabelle, die aus der Tabelle 10 abgeleitet wird, stellt Tabelle 11 dar.

Sollte es keinen systembedingten Vorteil bei der Detektionsentfernung geben, so müssten die Rangsummen alle in der Nähe der Erwartungswerte für die Rangsummen liegen, der sich aus dem Mittelwert der Rangziffern  $R$  multipliziert mit der Anzahl der auftretenden Sichtzeichen ergibt.

Eine deutliche Abweichung von diesem Mittel in negative Richtung ist nur für das System „Normal 1“ zu verzeichnen. Positiv sticht das maskierte Dauerfernlicht heraus. Die Systeme MatrixBeam und gleitende Leuchtweite sowie das System „Normal 2“ werden gleich bewertet. Die Frage ist, ob das maskierte Dauerfernlicht signifikant besser abschneidet. Diese Frage kann dahingehend umformuliert werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Abweichung vom Mittelwert durch Zufall bei Unterstellung einer Gleichverteilung der Ränge auftreten würde. Um diese Wahrscheinlichkeit zu berechnen kann man sich der Multinomialverteilung bedienen. Diese beschreibt ein Urnenmodell mit Zurücklegen und es lässt sich die Wahrscheinlichkeit errechnen, wie oft bei einer  $n$ -fachen Ziehung die einzelnen, in unserem Falle gleichverteilten ( $p_i = 0,2$ ), 5 verschiedenen Rangziffern  $R_i$  gezogen werden.

Die mathematische Herleitung führt an dieser Stelle zu weit. Für die Anzahl der Sichtziele  $n = 13$  geht die Multinomialverteilung in eine Normalverteilung über (vgl. etwa [83]). Deren Standardabweichung nimmt in Relation zur Bandbreite der möglichen Ergebnisse mit der Anzahl der Ziehungen  $n$  ab. Nach dem zentralen Grenzwertsatz [84] gilt für eine Zufallsvariable, die aus dem Zusammenwirken mehrerer identisch (hier: gleich-) verteilter Zufallsvariablen entsteht, dass sie annähernd normalverteilt ist.

$$Y = X_1 + \dots + X_N \text{ und } X_i \text{ hier gleichverteilt mit } p = 0,2 \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$E(X) = 3 = \mu \text{ und } Var(X) = 2,5 = \sigma^2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$Y = X_1 + \dots + X_M \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$Y \approx N(M \cdot \mu, M \sigma^2) \text{ für } M \rightarrow \infty \quad \text{Gl. 4-4}$$

Für unser vorliegendes Problem ergibt sich daher folgende Verteilung

$$Y \approx N(39; 5, 7) \quad \text{Gl. 4-5}$$

Es ist somit ersichtlich, dass eine Gleichverteilung in Bezug auf „Normal 1“ und MDF abgelehnt werden muss. System Normal 1 ist höchst signifikant schlechter als die anderen Systeme, das maskierte Dauerfernlicht (MDF) hoch signifikant besser. Diese Ergebnis kann leicht durch das Fehlen des Asymmetriezweiges des System Normal 1 erklärt werden, während das MDF durch die rechte vertikale Hell-Dunkel-Grenze eine sehr gute Ausleuchtung insbesondere der rechten Fahrbahnrandes ermöglicht. Fraglich ist, warum das MatrixBeam-System den rechten Fahrbahnrand schlechter ausleuchtet, obwohl es in dieser Hinsicht ähnliche technische Möglichkeiten wie das MDF besitzt.

Allerdings sind bei diesem Test nur die Rangfolgen der Systeme betrachtet, was keine quantitativen Aussagen über die Vorzüge der einzelnen Systeme zulässt. Die Trennschärfe dieses Tests ist hoch, jedoch kann die Stärke des Effektes unter Umständen schwach sein, wenn die Ergebnisse wie hier eng beieinander liegen. Auch bleiben die auftretenden, mitunter sehr hohen Standardabweichungen bei

dieser Art Test unberücksichtigt, lediglich die Mittelwerte werden stationsweise miteinander verglichen.

Die bisherige Betrachtung der Ergebnisse durch JOBSTVOGT legt nahe, dass es Unterschiede in der Performance der Systeme gibt [82]. Es kann bisher allerdings keine Aussage über die Höhe dieser Unterschiede gemacht werden. Dazu müssen die Daten detaillierter betrachtet werden.

Die Abbildung 24 stellt die Sichtbarkeitsentfernungen mit den zugehörigen Streuungen nochmals grafisch dar. Auffällig ist wiederum die hohe Sichtweite bei den alleinstehenden Sichtzielen 1,8 und 13. Hier fahren die Testpersonen mit allen Systemen im vollen Fernlichtmodus, falls sie im manuellen Betrieb richtig reagieren.

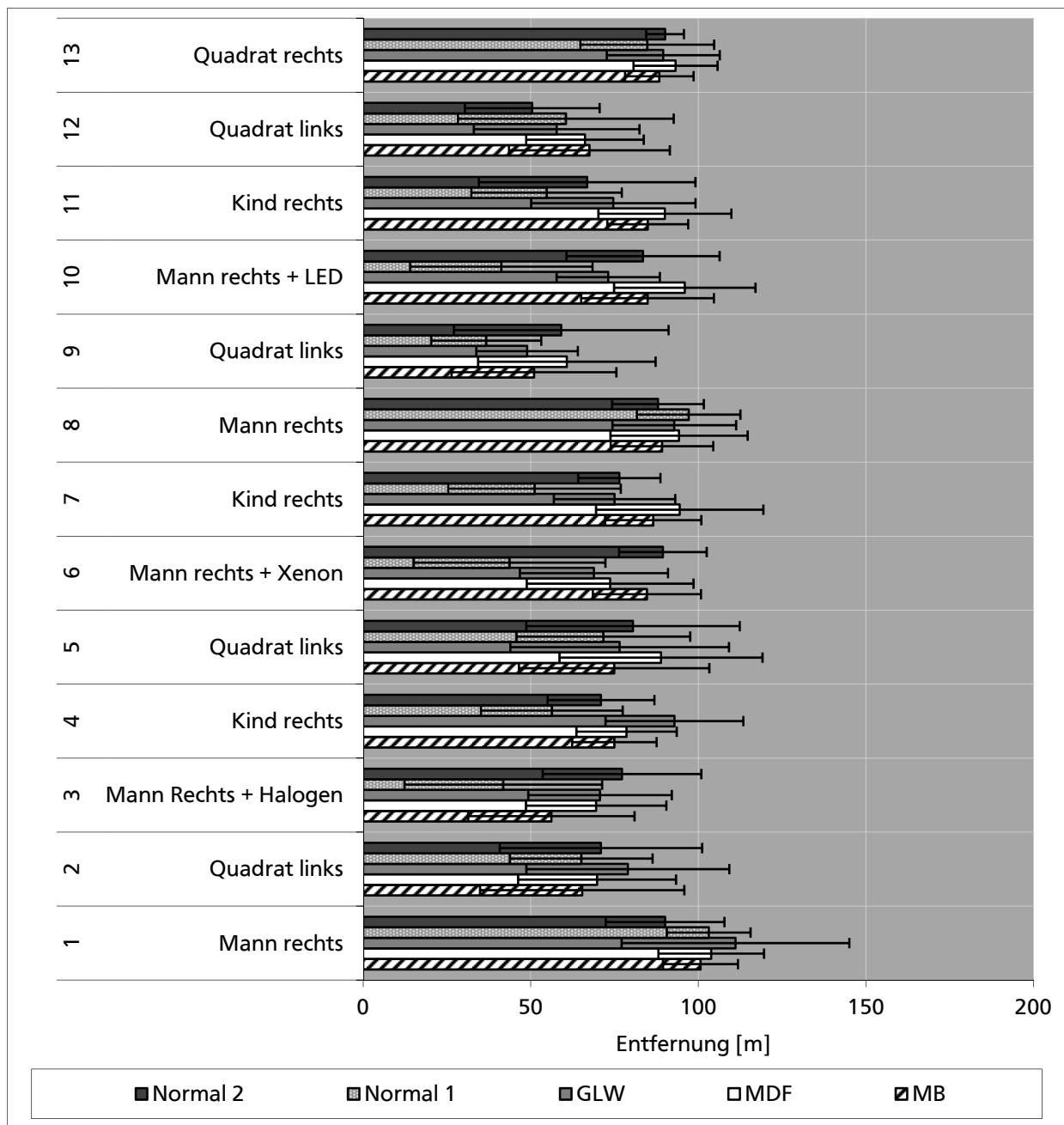
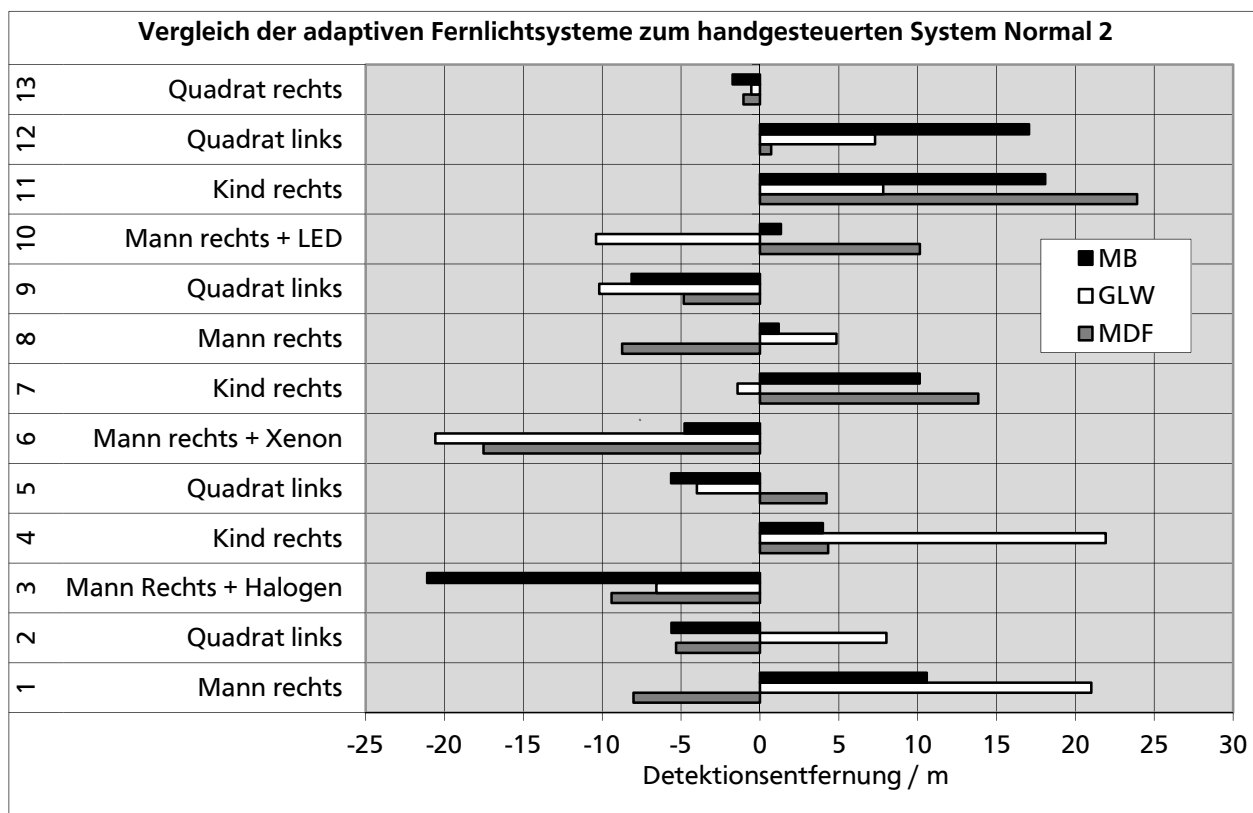


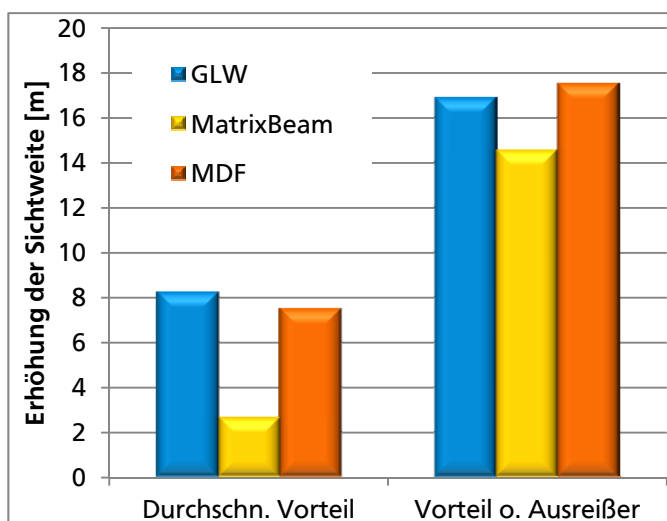
Abbildung 24: Grafische Übersicht über Mittelwerte und Standardabweichungen von Jobstvogt

Aus den bereits beschriebenen Gründen wird das System Normal 1 in der Folge nicht weiter betrachtet. Interessant ist nun lediglich, wie gut die adaptiven Systeme im Vergleich zum handbedienten System Normal 2 abschneiden.



**Abbildung 25:** Vergleich der mittleren Detektionsentfernungen  
Entfernungen mit adaptiven Fernlichtsystemen gegenüber einem handbedienten System (Jobstvogt). Referenz ist das System „Normal 2“. Die mit diesem System erreichte mittlere Detektionsweite ist der Referenzwert (0m). Die dargestellten Säulen sind die Differenzen der erreichten Detektionsweiten mit den anderen Systemen zu „Normal 2“.

Der Abbildung 25 kann ebenfalls nur ein uneinheitliches Bild entnommen werden. Es sieht auf den ersten Blick so aus, als sei das normale System den adaptiven Systemen gerade bei entgegenkommendem Verkehr (also vor den aufgestellten Scheinwerferracks) sogar überlegen. Direkt hinter den Scheinwerferracks arbeitet das MatrixBeam-System am schnellsten, da die Totzeit des Systems nur bei 250 ms liegt, während bei den beiden anderen Systemen 2 s eingestellt ist. Dies könnte den Vorteil des MB bei den Sichtzielen 7 und 11 erklären.



**Abbildung 26:** Risikokompensation der Autofahrer durch Erhöhung der Geschwindigkeit

Ansonsten können aus den Daten wenige Trends abgelesen werden. Weitere Aussagen sind nur dann möglich, wenn einige der oben erwähnten Einflussfaktoren eliminiert werden könnten. Da das Testsetup im Nachhinein nicht mehr zu ändern ist, kann nur der Lerneffekt der

Testpersonen nach der ersten Fahrt eliminiert werden. Dies führt natürlich zu einer extremen

---

Reduzierung der verwertbaren Datenbasis, was wiederum eine hohe Standardabweichung bedingt. Jedoch ist zu erwarten, dass eine Aussage über den Einfluss des Lerneffektes erzielt werden kann.

Werden nur die Detektionsentfernungen der jeweils ersten Fahrten der Probanden gewertet, dann ergeben sich die in Abbildung 26 links dargestellten Ergebnisse. Es fällt sofort auf, dass auch hier kaum Unterschiede zu dem Normalsystem zu erkennen sind. Erst wenn die Sichtziele 1,8 und 13 aus der Betrachtung eliminiert werden und zudem offensichtliche Ausreißer aus der Betrachtung gestrichen werden, kann man eine deutliche Verbesserung erkennen (rechts im Bild). Jedoch ist die Datenbasis für diesen Fall so gering, dass die Erkenntnisse nicht repräsentativ sein dürften.

Wertet man die Entwicklung der Detektionsentfernungen danach aus, in der wievielten Fahrtrunde sich ein Testteilnehmer befand, so erhält man ein eindeutiges Ergebnis. Die Entfernungen waren für jede weitere Fahrt besser als die der ersten Runde. Der Lerneffekt kann in den Daten also nachvollzogen werden.

## 4.2.5 Zukünftige Untersuchungen

Es darf vermutet werden, dass die uneinheitlichen Untersuchungsergebnisse zu einem wesentlichen Teil auf das Testdesign zurückgeführt werden können. So ist es für weitere Untersuchungen notwendig, dass der Lerneffekt der Fahrer ausgeschlossen wird, die sich die Positionen der Sichtziele einprägen können. Dies kann dadurch bewerkstelligt werden, dass jeder Fahrer nur ein System, also nur eine Runde, fährt. Die bessere Alternative wäre aber, einen Versuch mit veränderlichen Sichtzeichen durchzuführen, so dass ein „Auswendiglernen“ der Standorte nicht möglich ist. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass der Testparcours ausreichend lange gerade Streckenabschnitte aufweist. Der Fahrbahnbelag sollte keine unüblichen Welligkeiten beinhalten.

## 4.3 Ergebnisse der Befragung

Die Probanden der Test wurden nach den jeweiligen Fahrten gebeten, ihren Eindruck des Systems durch die Beantwortung von 20 Fragen zum Ausdruck zu bringen, aufgrund der missverständlichen Formulierung der Frage 18 wurde diese später nicht ausgewertet.

Die folgende Tabelle gibt die Antworten der Befragten wieder. Ein niedriger Durchschnittswert entspricht einer hohen Zustimmung, einer hoher Wert einer geringen Zustimmung. Bei der Interpretation der Antworten ist zu beachten, dass der Fragesinn der Fragen 3, 6, 8 und 17 umgekehrt ist, weshalb hier ein hoher Durchschnittswert eine hohe Zufriedenheit mit dem gefahrenen System darstellt. Einen Sonderfall bildet Frage 14, bei der die Probanden die Geschwindigkeit des Auf- und Abblendens beurteilen sollen. Hier ist ein Wert von 2,5 optimal. Die Streuungen liegen jeweils im Bereich einer Wertungsstufe oder darunter, was auf eine gute Einheitlichkeit der Nutzermeinungen schließen lässt.

Insgesamt stammen die Fragen aus drei größeren Bereichen. Zum einen wird die Akzeptanz der Entscheidungen der Systeme durch die Versuchspersonen getestet, wofür der Fragenkomplex 1, 9, 10, 16 und 17 zur Verfügung steht. In diesen Fragen geht es ganz grundsätzlich darum, ob das System in seiner Funktionsweise als angemessen und hilfreich charakterisiert wird. Wäre das nicht der Fall, so würde ein entsprechendes System vom Benutzer mit hoher Wahrscheinlichkeit häufig deaktiviert.

Die Antworten lassen für die Systeme MatrixBeam und GLW auf hohe bis sehr hohe Zustimmung schließen. Das System Maskierte Dauerfernlicht kommt ebenfalls auf gute Wertungen, jedoch wird es bei der Frage 1 statistisch signifikant schlechter bewertet, als die beiden anderen Systeme.

**Tabelle 12: Übersicht über die gegebenen Antworten in der Probandenbefragung**

Nr.	Frage	Mittelwert			Streuung		
		GLW	MB	MDF	GLW	MB	MDF
1	Ich fühle mich mit dem System wohl	1,54	1,41	2,24	0,51	0,57	1,02
2	Es ist deutlich zu erkennen, dass das System den Gegenverkehr entblendet.	1,86	2,00	1,90	0,85	0,85	0,90
3	Ich würde früher abblenden als das automatische System.	3,25	3,38	3,21	1,14	1,05	1,08
4	Dieses System erkennt andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig.	2,18	1,83	2,07	0,77	0,60	0,84
5	Ich kann jederzeit weit genug sehen.	1,89	1,48	1,79	0,69	0,69	0,82
6	Ich würde später abblenden als das automatische System.	3,68	3,69	3,86	1,02	0,89	0,83
7	Ein solches System erhöht die Verkehrssicherheit.	1,89	1,66	2,17	0,79	0,61	1,07
8	Mit dem System werden Fußgänger und Radfahrer mehr geblendet, als ohne das System.	3,25	3,17	2,72	0,89	1,10	1,03
9	Dieses System ist hilfreich.	1,89	1,48	1,97	0,83	0,57	0,82
10	Ich habe nicht das Gefühl, dass andere Fahrer sich durch das System gestört fühlen.	2,50	2,41	2,62	0,96	0,91	1,15
11	Ich finde diese Technologie interessant.	1,57	1,14	1,62	0,84	0,35	0,62
12	Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt.	2,18	1,93	2,55	1,16	1,03	1,24
13	Ich finde, dieses System sollte als selbstverständliche Ausstattung in jedes Auto (wie Airbag oder ABS).	2,21	2,03	2,59	1,10	1,09	0,98
14	Die Geschwindigkeit des Übergangs von Fernlicht auf Abblendlicht ist...	3,12	3,03	3,30	0,83	0,50	0,61
15	Mit einem solchen System können Fußgänger und Fahrradfahrer eher erkannt werden.	2,50	2,03	2,34	0,96	0,78	0,81
16	Durch das System kann ich mich mehr auf das Fahren konzentrieren.	2,00	1,62	2,07	0,86	0,86	0,84
17	Beim Fahren hatte ich das Gefühl, das Fernlicht per Hand steuern zu wollen.	4,00	4,28	3,93	1,12	0,92	1,13
19	Das Regeln der Leuchtweite im Abblendlichtmodus ist deutlich erkennbar.	2,35	2,25	2,68	0,85	0,93	0,84
20	Meine Sichtweite bei System XXX ist deutlich höher als bei normalem Abblendlicht.	2,00	1,69	2,00	0,92	0,60	0,71

Eine weitere Signifikanz ergibt sich bei Frage 9, bei der das MatrixBeam als hilfreicher charakterisiert wird.

Der zweite Fragenkomplex besteht aus den Fragen 2, 3, 6, 14 und 19. Hier soll die spezifische Technik der Systeme und ihre Erlebbarkeit durch den Probanden beurteilt werden. Dabei zielen die Fragen 2, 3, 6 und 19 direkt darauf ab zu prüfen, ob die Funktionsweise der Systeme auch dem Fahrer jederzeit sichtbar ist, oder ob sie nahezu unbemerkt bleibt. Auch soll geprüft werden, ob Ab- und Aufblendzeitpunkte mit dem eigenen Empfinden übereinstimmen.



**Tabelle 13: Ergebnisse der Befragung als Rangfolge (3 ist Höchstpunktzahl)**

Frage Nr.	Rangfolge der Systeme		
	GLW	MB	MDF
1	2	3	1
2	3	1	2
3	2	3	1
4	1	3	2
5	1	3	2
6	1	2	3
7	2	3	1
8	3	2	1
9	2	3	1
10	2	3	1
11	2	3	1
12	2	3	1
13	2	3	1
14	2	3	1
15	1	3	2
16	2	3	1
17	2	3	1
19	2	3	1
20	1,5	3	1,5
Rang- summen	35,5	53	25,5

Alle drei Systeme werden bei diesen fünf Fragen ähnlich bewertet. Keines erhielt bei einer der Fragen statistisch signifikant andere Bewertungen. Es fällt jedoch auf, dass das System MatrixBeam fast durchgängig die besten Noten erhält (s. Tabelle 13).

Es zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass es von den gängigen Projektionssystemen in der Technologie stark unterschiedlich ist. Allein schon die Tatsache, dass es sich bei den Leuchtmitteln um LEDs handelt, macht das System für die Benutzer interessant. Auch ist die eingestellte Totzeit mit 250 ms deutlich geringer als bei den beiden anderen Systemen (2 s). Diese beiden Effekte können die gemessenen Unterschiede hinreichend erklären.

Für den Erfolg adaptiver Fernlichtsysteme ist neben der Akzeptanz eines bestimmten Ausstattungsmerkmals ebenso wichtig, ob potenzielle Kunden bei gegebenem Budget ein solches System bestellen würden. Diese Bereitschaft sollte, sofern dass mit den bescheidenen Mitteln der Befragung möglich ist, mit den Fragen 11, 12 und 13 ermittelt werden.

In diesem Fragekomplex wird das MatrixBeam als eindeutig interessanteste Technik identifiziert. Die Bewertung ist höchst signifikant besser, als die der beiden anderen Systeme. Insofern wundert es nicht, dass auch die Bereitschaft zum Kauf dieses Systems wesentlich höher ausfällt, als bei GLW oder MDF. Auch wünschen sich mehr Personen dieses System als Serienausstattung.

Die beiden anderen Systeme unterschieden sich in der Bewertung auch deutlich, aber noch nicht statistisch signifikant. Dabei wird die GLW als interessanter eingestuft und dementsprechend auch eher „gekauft“ oder als Serienausstattung gewünscht.

Die für diese Untersuchung wichtigsten Fragen betreffen die gefühlte Sicherheit und den Sicherheitsgewinn mit diesen Systemen. Das Ergebnis dieses Teils lässt sich direkt mit dem tatsächlich aufgetretenen Sicherheitsgewinn vergleichen. Zur Evaluierung können die Antworten auf den Komplex aus den Fragen 4, 5, 7, 8, 15, und 20 herangezogen werden.

Dabei schneidet wiederum MatrixBeam als bestbewertetes System ab. Die Sichtweite (Frage 5) wurde hier gegenüber dem System GLW als signifikant besser bewertet. Ebenso ist die gefühlte Erhöhung der Verkehrssicherheit deutlich größer, als bei den beiden anderen Systemen. Auch die bessere Erkennung von Fußgängern wird eher mit diesem System in Verbindung gebracht, als mit den beiden anderen.

Betrachtet man die gesamten Ergebnisse der Befragung nach den Rängen, die die einzelnen Systeme bei den 19 Fragen erhalten haben, so ergibt sich ein eindeutiges Bild. Dabei ist der Rang 3 der Rang mit der jeweils positivsten durchschnittlichen Antwort.

Bei dieser Vorgehensweise müssten, wenn es keine gravierenden Unterschiede in der Bewertung der drei Systeme gäbe, die Rangsummen gleichverteilt sein. Das Vorgehen ist also dasselbe, wie beim

---

Vergleich der erzielten Sichtweiten. In diesem Fall müsste sich analog zum obigen Beispiel die folgende Verteilung ergeben.

$$Y = X_1 + \dots + X_N \text{ und } X_i \text{ hier gleichverteilt mit } p = 0,33 \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$E(X) = 2 = \mu \text{ und } Var(X) = 1 = \sigma^2 \quad \text{Gl. 4-7}$$

$$Y = X_1 + \dots + X_M \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$Y \approx N(M \cdot \mu, M \sigma^2) \text{ für } M \rightarrow \infty \quad \text{Gl. 4-9}$$

Für unser vorliegendes Problem ergibt sich mit  $M = 19$  daher folgende, theoretische Verteilung

$$Y \approx N(38; 19) \quad \text{Gl. 4-10}$$

Es ist leicht ersichtlich, dass das System MDF außerhalb des  $2,58 \cdot \sigma$ -Bereiches (99 %-Umgebung) liegt. Es wird also insgesamt deutlich schlechter bewertet, als das bei zufälliger Verteilung der Fall sein dürfte. Umgekehrt gilt diese Aussage für das System MatrixBeam. Es liegt außerhalb der erwähnten Umgebung in positiver Richtung, wird also deutlich besser bewertet, als dies zu erwarten wäre. Das System GLW liegt bei den Bewertungen im Mittelfeld.

#### 4.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und des Akzeptanztest

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die adaptiven Fernlichtsysteme eine deutliche Verbesserung der Detektionsweite auch bei Gegenverkehr erwarten lassen. Die Ergebnisse der detaillierten Analyse lassen einen Vorteil von 14-18 m erwarten. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  einer zusätzlichen Reaktionszeit von etwa 0,6-0,8 s, was eine deutliche Risikominimierung für Fußgänger und unbeleuchtete Objekte darstellt.

Wichtig ist ebenfalls die optimale Gestaltung der Totzeiten des Systems. Eine zu große Totzeit führt zu spätem Aufblenden nach dem Passieren eines anderen Verkehrsteilnehmers, eine zu kurze zu unruhigem, instabilem Verhalten des Systems. Die Totzeit sollte nach den Ergebnissen des Tests eine Sekunde auf keinen Fall überschreiten.

Hier stellt sich die Frage, ob diese subjektiven Einschätzungen durch die Ergebnisse des Fahrtests getragen werden. Untersucht werden kann nur, ob der empfundene Sicherheitsgewinn der tatsächlichen Entwicklung der Sichtweite entspricht.

Vergleicht man den Rangfolgetest, dem die Sichtweiten an den einzelnen Sichtzielen unterzogen wurde, mit dem Rangtest zur Befragung, so stellt man fest, dass das System, das zu den besten Resultaten führte (Maskiertes Dauerfernlicht), am deutlich schlechtesten bewertet wurde.

Über die Gründe kann hier nur spekuliert werden. Sicherlich trägt der schon oben erwähnte „Sympathiebonus“ gegenüber der derzeit stark propagierten LED-Technologie seinen Teil zur deutlich positiveren Wahrnehmung des MatrixBeam gegen über der Gleitenden Leuchtweite und dem maskierten Dauerfernlicht bei. Die subjektive Wahrnehmung des Systems lässt sich durch die Messwerte jedoch nicht bestätigen.

---

## 5 Statische Untersuchungen zur Blendungsbegrenzung

Adaptive Fernlichtsysteme basieren auf der Modulation der Lichtstärkeverteilung der Scheinwerfer. Da die Informationen über vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer über ein kameragestütztes System funktioniert, ist die Zuverlässigkeit begrenzt.

Mögliche begrenzende Faktoren auf Seiten der Kamera sind unter anderem Auflösung, Öffnungswinkel des Objektivs und die Dynamik der Empfindlichkeit. Zudem muss eine leistungsfähige Objekterkennung die Scheinwerfer und Rückleuchten der anderen Verkehrsteilnehmer zuverlässig erkennen und ihre Lage abschätzen. Eine gute Robustheit der Erkennung und die Abgrenzung anderer Objekte, insbesondere von Rückstrahlern und hellen retroreflektierenden Verkehrsschildern, ist Voraussetzung für ein funktionierendes und von den Kunden akzeptiertes System.

Die Funktionsfähigkeit kann auch durch äußere, also umweltabhängige, Faktoren eingeschränkt sein. Hier ist vor allem das Wetter zu nennen. Verdreckte Scheiben oder schlechte Scheibenwischer können ebenfalls zu Problemen führen.

Alle diese Faktoren schränken die fehlerfreie Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer ein. Es stellt sich also die Frage, ab welcher Entfernung andere Verkehrsteilnehmer zwingend erkannt werden müssen, damit das automatische System nicht zu übermäßiger Blendung führt („undue glare“, s. auch ECE R 123 [1]).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie die optimale Einstellung der Lichtstärkeverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung potenziell geblendeter Verkehrsteilnehmer gestaltet werden muss. Eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer soll zu jeder Zeit ausgeschlossen sein. Da die Ergebnisse so formuliert sind, dass sie die Entfernung eines Objektes mit einer bestimmten Höchstlichtstärke in dessen Richtung verknüpfen, können sie auf jede Art von adaptiven Fernlichtsystemen angewandt werden.

### 5.1 Grundlagen zur Blendung und Readaptation

Die DIN EN 12665 definiert Blendung als „unangenehmen Sehzustand durch ungünstige Leuchtdichte-Verteilung oder zu hohe Kontraste“ [85]. Um die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Straßenverkehr und der Unfallforschung würdigen zu können, werden im folgenden die physiologischen und psychophysischen Mechanismen der Blendung in Kürze beschrieben.

#### 5.1.1 Arten der Blendung

Einen guten Überblick über die Arten der Blendung und deren Gründe liefert Vos [86]. Während er in der Abhandlung acht Arten unterscheidet, kommen im Straßenverkehr vor allem vier Arten vor (vgl. [87]).

1. **Sättigungsblendung (engl.: saturation glare):**

Diese entsteht z.B. durch das Fahren bei starkem Sonnenschein, also der zeitlich langen Konfrontation des Gesichtsfeldes mit einer hohen Leuchtdichte.

## 2. Adaptationsblendung (engl.: adaptation glare):

Sie tritt z.B. bei Herausfahren aus einem langen Tunnel bei Tageslicht auf, also bei einem plötzlichen starken Leuchtdichteanstieg im Gesichtsfeld.

## 3. Physiologische Blendung (engl.: disability glare):

Diese entsteht z.B. durch die Frontscheinwerfer von entgegenkommenden Kraftfahrzeugen bei Nacht insbesondere bei vergessenem Abblenden, also der punktuellen Erhöhung der Leuchtdichte gewisser Bereiche im Gesichtsfeld. Es entsteht ein Leuchtdichteschleier um die Blendquelle im Gesichtsfeld. Dieser setzt die Sehleistung messbar herab.

## 4. Psychologische Blendung (engl.: discomfort glare):

Der Begriff beschreibt ein durch Blendung entstehendes Unbehagen bzw. Unwohlsein des Geblendeten. Die Sehleistung muss dabei nicht messbar beeinträchtigt sein.

Von den hier beschriebenen vier Blendungsformen sind insbesondere die physiologische und psychologische Blendung für die Charakterisierung von Fernlichtassistenzsystem bzw. Scheinwerfersystemen relevant. Hierbei schließen sich beide Blendungen nicht aus und können gemeinsam oder getrennt auftreten (vgl. [88]). Im Folgenden wird auf die Ursachen und Auswirkungen dieser Blendungsformen genauer eingegangen.

### Ursache und Auswirkungen von physiologischer Blendung

Das visuelle System des Menschen ist in der Lage, sich an Leuchtdichten über zwölf Zehnerpotenzen hinweg anzupassen. Dazu muss es allerdings teilweise langwierige Anpassungen in der elektrochemischen Sehprozesskette durchlaufen (Adaptation). Gleichzeitig darstellen kann es hierbei eine Bandbreite an Leuchtdichten von etwa drei Zehnerpotenzen (vgl. [87]).

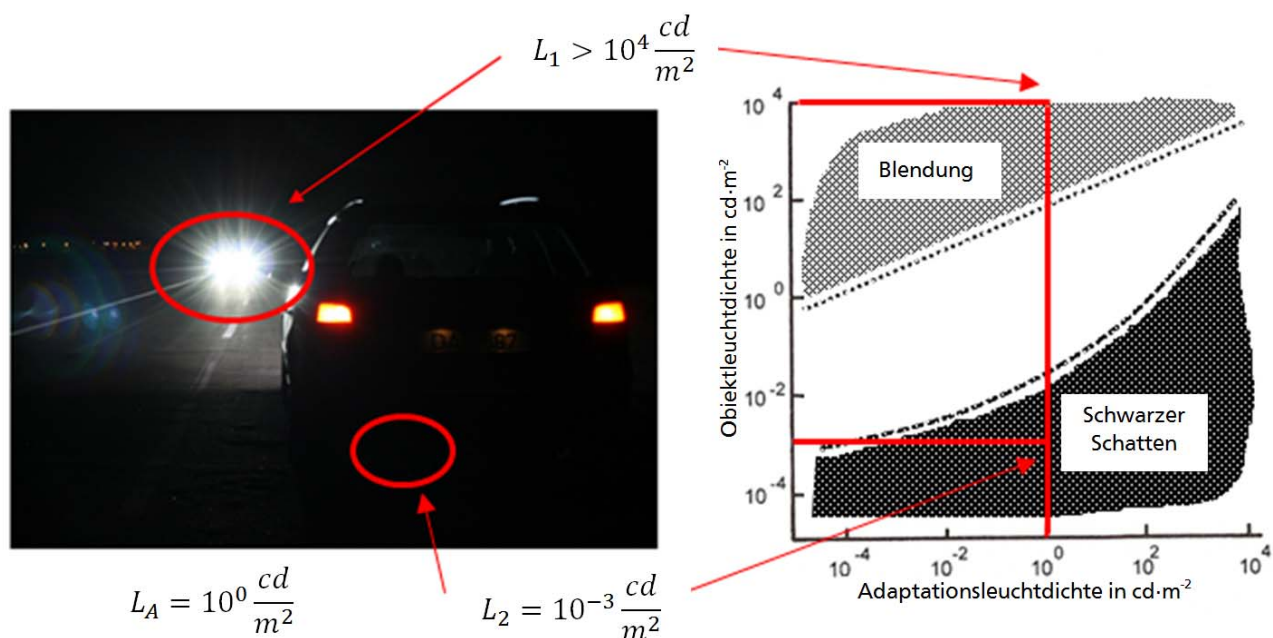
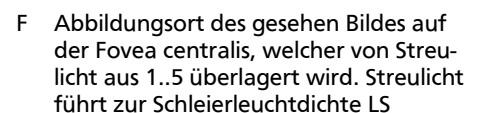


Abbildung 27: Blendungsszenario im Straßenverkehr.

Die Adaptationsleuchtdichte erlaubt die differenzierte Wahrnehmung von Objekten nur einem bestimmten Leuchtdichtebereich. Das Auto ist aufgrund der blendenden Scheinwerfer nicht zu erkennen, ebenso können dunkle Bereiche der Fahrbahn oder des Fahrbahnrandes nicht aufgelöst werden.

Zusätzlich zu der beschriebenen Übersteuerung des aktuellen Adaptationsniveaus kommt es bei physiologischer Blendung zu einem leuchtenden Schleier. Diese Schleierleuchtdichte erstreckt sich von der Blendquelle ausgehend über das ganze Gesichtsfeld. Vos nennt als grundlegende Ursache hierfür das in das Auge einfallende Streulicht (vgl. [89]). Das Streulicht entsteht hierbei an Hornhaut, Linse, Glaskörper sowie an deren Grenzflächen (vgl. Abbildung 28). Die Mechanismen und Anteile an der Streuung des Lichtes der einzelnen Augenbestandteile wurden vor allem am niederländischen TNO (Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) erforscht und durch Vos beschrieben [90-92]. Das Auge reagiert auf diesen Leuchtdichteschleier indem es auf ein höheres Leuchtdichteniveau adaptiert.



55



---

Stressempfindungen werden durch ein ständiges Abschweifen der Blickrichtung in Richtung Blendquelle hervorgerufen, was wiederum eine ständige Adaptation des Auges zur Folge hat. Die genauen psychologischen Effekte sind hingegen aber noch weitgehend unbekannt. Interpretiert werden kann sie als eine Schutzreaktion des Menschen, der sich durch eine Abwendungsreaktion außer Gefahr bringen will (vgl. [88]).

Die psychologische Blendung hängt von der Umgebungsleuchtdichte ab, der Größe und der Leuchtdichte der Blendquelle sowie dem Abstand zur Blendquelle. Die Weltgesundheitsorganisation WHO beschreibt ein Auftreten der psychologischen Blendung insbesondere bei plötzlicher Konfrontation des dunkeladaptierten Auges mit einer sehr hellen Lichtquelle. Ein Fernlichtassistenzsystem kann genau dies in verschiedensten Situationen verursachen aber auch verhindern.

### 5.1.3 Abhängigkeit vom Alter

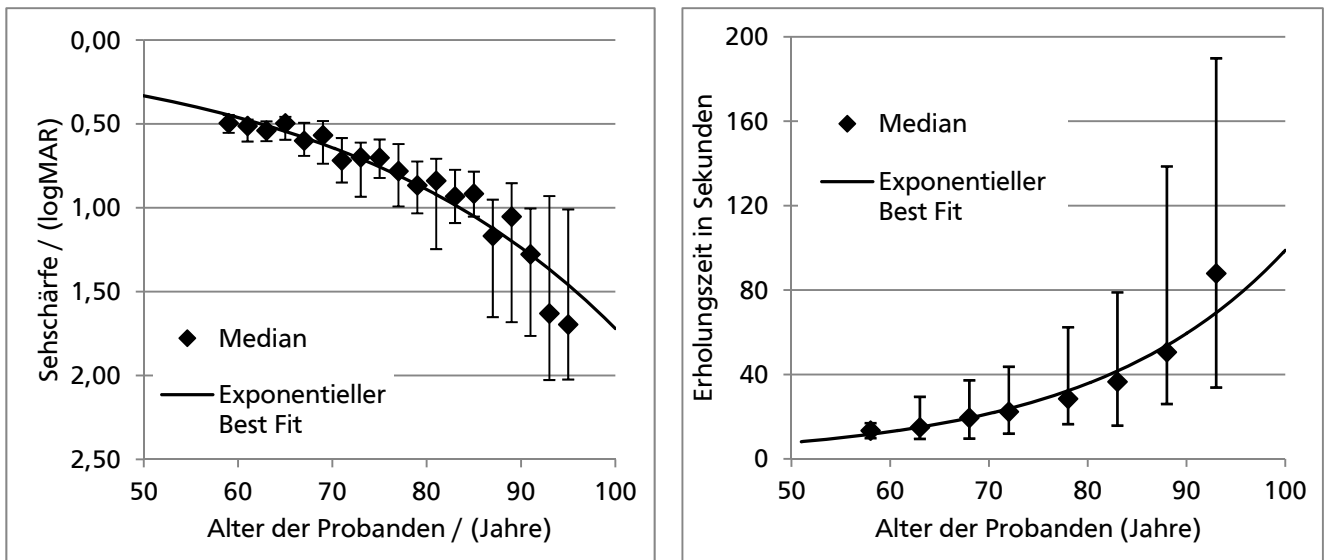
In einer Gesellschaft, deren Durchschnittsalter stetig steigt, ist besonders das Wissen über die Abnahme der Sehkraft mit steigendem Lebensalter für die Entwicklung der Verkehrssicherheit entscheidend. Einen ersten Überblick über die verschiedenen für die Verkehrslichttechnik relevanten Dimensionen der Reduzierung der visuellen Leistung im Alter gibt PARAMEI [96]. LACHENMAYR zeigt in einer Vielzahl von Publikationen den Einfluss des Sehens im Alter auf die Fahrtüchtigkeit auf (etwa in [97-100]).

Es wird angenommen, dass die neuro-physischen Aspekte eine untergeordnete Rolle bei der Abnahme der Sehleistung spielen [101]. Die ständige Erneuerung der am Sehprozess beteiligten Zellen sorgt für eine sehr langsame und stetige Verschlechterung der Sehleistung, die durch den größeren Effekt der abnehmenden Beleuchtungsstärke an der Retina überlagert wird.

Dieser reduzierte optische Transmissionsgrad des optischen Systems hat seine Ursachen zum einen in der Trübung und Vergilbung der Augenlinse und zum anderen in der verringerten Dehnbarkeit der Pupille (senile Miosis). Die über die Lebenszeit in den verschiedenen Bestandteilen des Auges eingelagerten Partikel sorgen zudem für einen höheren Streulichtanteil [102]. Dieser ist maßgeblich für die höhere Blendempfindlichkeit älterer Verkehrsteilnehmer, selbst wenn sie augenphysiologisch gesund sind. Katarakt und Glaukom sind darüber hinaus Erkrankungen, die zusätzliche Sehschwäche und Blendempfindlichkeit bedingen.

Eine umfassende Studie von HAEGERSTROM-PORTNOY et al. mit 900 Probanden im Alter von 58 bis 102 Jahren gibt einen umfassenden Überblick über die unterschiedlichen Aspekte der nachlassenden Sehleistung im Alter [103]. Da für das vorliegende Thema besonders die Größen entscheidend sind, die durch Blendung beeinflusst werden, werden zwei Ergebnisse der Studie in Abbildung 29 vorgestellt. Es zeigt sich, dass sowohl Blendempfindlichkeit als auch Erholungszeit exponentiell mit dem Alter zunehmen. Diese Ergebnisse decken sich gut mit den Resultaten verschiedener anderer Studien. Auch wenn die Verfahren und Definitionen jeweils leicht unterschiedlich sind, bestätigt sich die generelle Abnahme der Sehleistung im Alter qualitativ.

Speziell die Abhängigkeit der Blendung vom Alter der Probanden wurde des Weiteren von READING untersucht [104]. Es ergab sich eine positive Korrelation zwischen der Blendempfindlichkeit einer Person und ihrem Alter. Gleiches gilt für die Readaptationszeit nach einer Blendung [105]. SCHARVEY weist darauf, dass 21,4 % der 60-69jährigen und bereits 40 % der 70-79jährigen aufgrund von zu hoher Blendungsempfindlichkeit fahruntauglich sind. Sie bestätigt damit Untersuchungen von AULHORN et al., nach deren Untersuchung 34% bzw. 54 % der über 70jährigen aufgrund nicht ausreichender Dämmerungssehschärfe bzw. gesteigerter Blendempfindlichkeit nicht fahrtauglich waren [106].



**Abbildung 29: Altersabhängigkeit der Blendung**  
 Abnahme der Sehschärfe (links) und Zunahme der Readaptationszeit (rechts) im Alter nach Blendung in Abhängigkeit vom Alter des Probanden. logMAR ist der logarithmisierte „Minimum Angle of Resolution“, je größer dieser Wert, desto kleiner dementsprechend die Sehschärfe.

Eine Fahrtauglichkeit wird dann abgesprochen, wenn der minimale benötigte Kontrast zum Lösen einer Sehaufgabe 1:5 überschreitet (Sehschärfe). Wenn auch die höchste Kontraststufe unter Blendung (1:23,5) nicht erkannt wird, kann ein Gutachter ein Nachtfahrverbot vorschlagen [100]. Unabhängig voneinander weisen LACHENMAYR und OTTE einen statistisch signifikanten Zusammenhang der Blendempfindlichkeit und der Unfallhäufigkeit von Autofahrern nach [98, 107]. Dennoch sind weder eine nach den Empfehlungen der DOG (Abk.: Deutsche ophthalmologische Gesellschaft) unzureichende Dämmerungssehschärfe noch eine zu hohe Blendempfindlichkeit nach der gültigen Fahrerlaubnisverordnung (FeV) ein Grund, eine Fahrerlaubnis zu versagen. Der Bewerber muss lediglich auf seine Schwäche hingewiesen werden [108]. Die Verkehrsexperten der DOG um LACHENMAYR beklagen diesen Umstand in ihren Empfehlungen bereits seit Jahren [99, 109-111].

Die erhöhte Blendempfindlichkeit im Alter begründet sich zum einen aus der höheren Streuung des Lichtes an den angesprochenen Verunreinigungen des Glaskörpers und zum anderen aus verlangsamten chemischen Adaptationsprozessen in der Retina. Die Tatsache, dass kurzwelligere Strahlung stärker gestreut wird als langwellige legt die Vermutung nahe, dass Gasentladungs- oder LED-Strahlung einen schädlicheren Einfluss auf diese Fahrer haben könnte, als auf Jüngere.

#### 5.1.4 Einfluss von Alkohol und Drogen

Alkohol hat Einfluss auf viele neuronale Prozesse, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Einlagerung der Ethanolmoleküle in die Membranproteine der Nervenzellen verursacht wird. Dies wirkt sich besonders auf die für den Sehprozess wichtigen Ionenkanäle aus [112]. Je nach Publikation beginnt eine Verminderung der Sehleistung bereits ab 0,3 ‰.

Die häufig mit Drogenkonsum einhergehende Weitstellung der Pupillen führt in der Regel zu einer höheren physiologischen Blendung. Neben schlechterem räumlichen und dynamischen Sehen sowie einem eingeschränkten Sichtfeld, erhöht sich auch die Erholungszeit von Blendung signifikant, da die neuro-physiologischen Prozesse in der Retina gestört sind [113-118]. Eine ähnliche Wirkung konnte auch für Marihuana nachgewiesen werden. Eine gute Übersicht über einschlägige Studien und die entdeckten Wirkzusammenhänge gibt Yazulla [119].



### 5.1.5 Messbarkeit der Blendung

Für die Messbarkeit der Blendung ist zunächst zu definieren, welche Art der Blendung gemessen werden soll. Wie bereits diskutiert, kann eine Blendung für den Probanden subjektiv vorhanden sein, jedoch ist sein Sehvermögen noch nicht messbar reduziert. Die in diesem Fall vorliegende psychologische Blendung kann messtechnisch nicht immer nachgewiesen werden.

#### Messung der psychologischen Blendung

Zur subjektiven Bewertung des Blendungseinflusses durch den Probanden wurden verschiedene Skalen verwendet und mehrfach modifiziert. Einen guten Überblick über diese Entwicklung bietet GELLATLY [120].

Zunächst wurde der Begriff der Grenze zwischen Komfort und Diskomfort (engl. *Borderline between Comfort and Discomfort*, Abk.: BCD) geprägt. In eine Studie von LUKIESH UND GUTH sollten Probanden eine Blendquelle so einstellen, dass sie die Blendung als gerade noch hinnehmbar qualifizieren würden [121]. Aus den Ergebnissen wollte man generell gültige Aussagen über die Dimensionierung von Lichtquellen ableiten. Mit einer solchen Methodik lassen sich jedoch keine vorhandenen Blendquellen beurteilen, die vom Beobachter nicht manipuliert werden können.

In den folgenden Jahren wurden verschiedene Skalen entwickelt, z.B. von HERMION, ADRIAN und FISHER [122-124]. In den jüngeren Publikationen wird jedoch größtenteils auf die bereits in den sechziger Jahren entwickelte Skala von DE BOER zurückgegriffen [125]. Diese Skala teilt den Bereich der möglichen Blendbelastungen in eine 9-Punkte-Skala ein. Dabei werden jedoch nur 5 Punkte mit Bezeichnungen erklärt. Die Skala reicht von einer unmerklichen Beeinträchtigung („unnoticable“) bis zu einer unerträglichen Blendung („unbearable“). In verschiedenen Publikationen wurden die Bezeichnungen immer wieder leicht verändert oder übersetzt. Eine direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Studien ist daher nicht immer gegeben.

Umstritten ist die Auswirkung der psychologischen Blendung auf die Fahrleistung der Autofahrer. THEEUWES kommt zu einem uneinheitlichen Ergebnis, bezweifelt aber, dass die Wertung einer Blendung auf der De Boer-Skala nicht mit der Änderung der Fahrleistung korreliert [126].

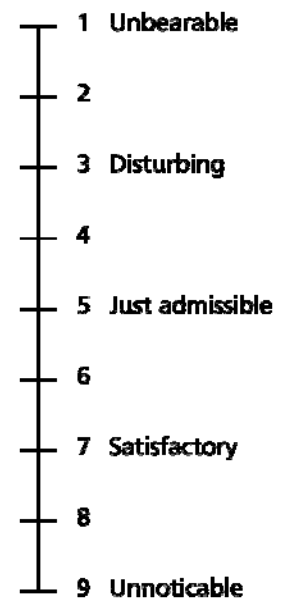


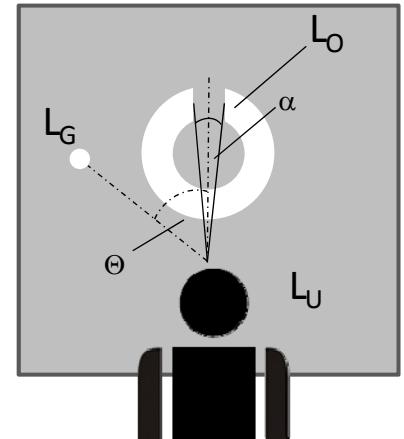
Abbildung 30: Originale DeBoer-Skala

#### Messung der physiologischen Blendung

Da die physiologische Blendung eine direkte Herabsetzung des Sehvermögens zur Folge hat, kann sie über die Messung dieser Auswirkung bestimmt werden. Diese Art Blendung wird durch das Streulicht verursacht, welches eine helle Lichtquelle im Auge erzeugt (s. Kapitel 5.1.1). Die Herabsetzung der Sehleistung eines Probanden kann daher mit der individuellen Streuung des Lichtes in seinem Auge in Verbindung gebracht werden. Personen mit höherem Streulichtanteil sehen in der Regel unter Blendung schlechter [127]. Einen guten Überblick über die klinischen Messmethoden liefert ASLAM [128].

Die Messung der Auswirkung der Blendung ist die zuverlässigere Methode. Dabei wird der Unterschied zwischen der Sehleistung eines Menschen ohne Blendung und der verbleibenden Sehleistung unter Blendung gemessen. Als Vergleichsmaßstab kann entweder dieselbe Testperson gelten oder aber der normalsichtige Durchschnittsproband.

Als Testaufgaben werden in der Regel Buchstabenreihen [129] oder Landoltringe verwendet, die in verschiedenen Kontraststufen oder Schwinkeln dargeboten werden. Grundsätzlich besteht der Testaufbau aus der Sehaufgabe und einer Blendquelle. Abbildung 31 zeigt den normalen Aufbau einer Sehaufgabe zur Bestimmung des Blendungseinflusses einer Testperson. Dabei wird ein Testzeichen (hier ein Landoltring) in verschiedenen Leuchtdichtestufen  $L_O$  gezeigt, die in einem bestimmten Kontrastverhältnis zur Umfeldleuchtdichte  $L_U$  stehen. Die Leuchtdichte  $L_G$  der Blendlichtquelle ergibt über den Abstand  $d$  der Testperson die Blendbeleuchtungsstärke  $E_B$  am Auge des Probanden. Sehwinkel  $\alpha$  und Blendwinkel  $\theta$  legen die Geometrie der Objekte im Gesichtsfeld des Beobachters fest. Die Erhöhung der Schwellenleuchtdichte  $\Delta L = L_O - L_U$  bei der unter Blendung das Sehzeichen gerade noch erkannt wird, sind Maße für die Blendung.



**Abbildung 31: Standard-Sehaufgabe im Labor zur Blendungsmessung**

Das Prinzip dieser Messung ist in vielen Publikationen angewandt und ist auch auf den Straßenverkehr übertragbar, wie später erläutert wird. Alternativ kann jedoch auch die Größe des Sehzeichens variiert werden, wodurch die Blendung dann über die Verringerung der Sehschärfe messbar wird. Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand ist jedoch die Kontrastsehfähigkeit interessanter.

## 5.2 Methoden

In einem Freifeldversuch wird die physiologische Blendung von Testpersonen in Abhängigkeit von der Blendbeleuchtungsstärke, des Abstandes und des Blendwinkels untersucht. Die Bewertung der Blendung erfolgt über die Messung der Schwellenkontrasterhöhung. Sehzeichen ist ein Landoltring, der per Digitalprojektor auf eine Leinwand 50m vor dem Probandenfahrzeug projiziert wird.

Durch gleichzeitige Bewertung der psychologischen Blendung wird eine mögliche Korrelation zwischen den Blendungsarten überprüft und mit existierenden Modellen verglichen.

Im Folgenden wird der Testaufbau des Freifeldversuchs näher beschrieben und auf die Methoden der Blendungsbewertung eingegangen.

### 5.2.1 Versuchsaufbau

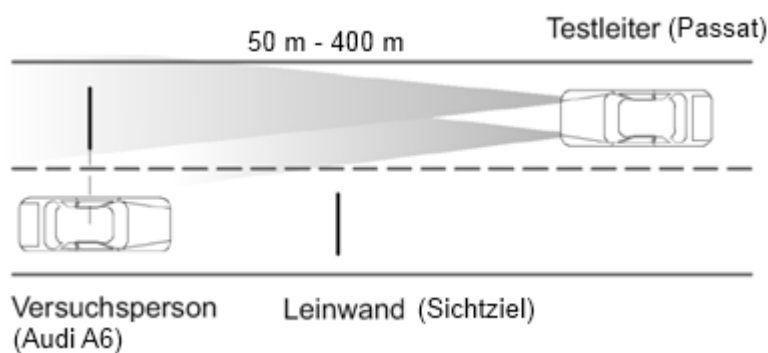
Der Freifeldversuch wird auf dem universitätseigenen Testgelände am August-Euler-Flugplatz realisiert. Das Versuchsfeld bietet eine kontrollierte Versuchsumgebung ohne äußere Blendlichtquellen oder unnatürlichen Streulichteinfluss. Denkbar sind Blendungsversuche mit bis zu 1200 m Abstand, praktisch ist der Versuch jedoch durch die verwendete Wireless LAN Technologie mit Richtantennen auf maximal 400 m Blendungsentfernung beschränkt.

Auf die Rollbahn des Flugplatzes werden retroreflektierende Fahrbahnmarkierungen aufgebracht, die eine Landstraße mit 3,25 m Fahrbahnbreite je Fahrtrichtung darstellen. Als Versuchsfahrzeuge dienen ein Audi A6 mit Xenon-Scheinwerfern und ein VW Passat mit vertikal schwenkbarem Scheinwerferrack.

Als Blendfahrzeug dient der VW Passat, dessen Scheinwerferrack sich in der Neigung verstellen lässt. Auf dem Rack sind Audi A6 HID-Scheinwerfer montiert, die als Blendlichtquelle dienen. Die Variation der Blendbeleuchtungsstärke geschieht durch die Verstellung der Neigung des Scheinwerferracks im

Bereich von  $\alpha = -1,5 \%..+3 \%$ . Eine konstante Neigung im Verhältnis zum Probandenfahrzeug wird durch eine Laser-Referenzierung sichergestellt, wodurch Fehler durch Unebenheiten und Welligkeit des Fahrbahnbelages ausgeschlossen werden können.

Die Probanden nehmen im Audi A6 Platz und sind daher auf eine Xenon-Lichtverteilung adaptiert. Am Fahrzeug sind zwei Beleuchtungsstärkemesser in der unmittelbaren Nähe des Probandenauges installiert. Dabei befinden sich ein Empfänger außerhalb des Fahrgastraumes auf der Windschutzscheibe und ein weiterer innerhalb, direkt neben dem linken Fahrerauge. Für die Blendungsbewertungen bilden die am Fahrerauge gemessenen Beleuchtungsstärken die Bezugsgrößen, während die entsprechenden außen gemessenen Größen eine Berechnung der zugehörigen Lichtstärke der Scheinwerfer in Richtung des Probandenauges ermöglichen. Im Probandenfahrzeug gibt es außerdem einen Schieberegler, mit dem die Probanden den Grad der psychologischen Blendung auf einer nicht unterteilten Skala von 0 bis 100 % einstellen können. Zusätzlich wird die Intensität der empfundenen Beeinträchtigung als Wert der DeBoer-Skala mündlich abgefragt.



**Abbildung 32: Schematischer Versuchsaufbau**

Die Schaufgabe für den Probanden besteht aus einem Landoltring der Größe ( $\beta = 30'$ , Öffnungsgröße  $\alpha = 6'$ ), der auf eine mattschwarze Fläche ( $\rho = 5 \%$ ) projiziert wird. Der Landoltring wird Buchstaben vorgezogen, da diese nach ELLIOT nicht alle die gleiche Erkennbarkeit aufweisen [130, 131]. Zur Darstellung wird ein DLP-Digitalprojektor verwendet. Der Landoltring kann in seiner Leuchtdichte gegenüber dem Hintergrund variiert werden. Gemessen wird der Leuchtdichteunterschied zwischen Hintergrund und Landoltring, bei dem die Testperson die Orientierung des Rings gerade noch erkennen kann. Die Messung erfolgt mit einer Leuchtdichtekamera.

Der Testleiter befindet sich während des Tests im VW Passat, um eine Störung der Testperson durch Streulicht des Rechnerdisplays zu vermeiden. Die Protokollierung der Messergebnisse der Beleuchtungsstärkemesser und Leuchtdichtekamera sowie des Probandenfeedbacks erfolgt über eine WLAN-Verbindung zum PC im Probandenfahrzeug.

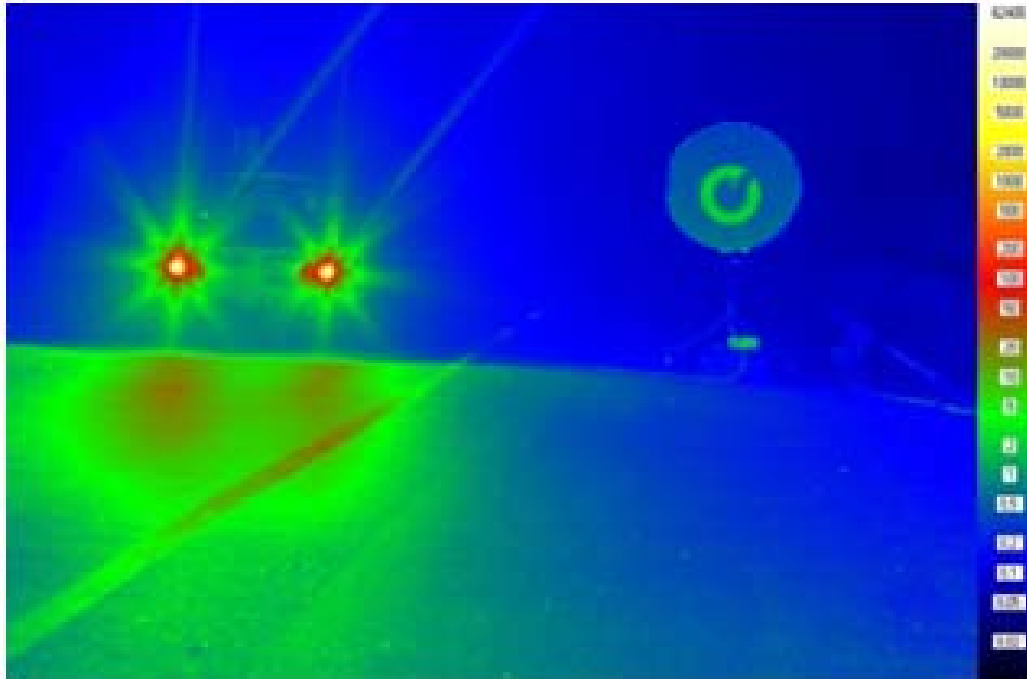
Ein ähnlicher Aufbau wurde auch von SCHIEFER verwendet, um den Einfluss der Farbe eines Blitzgerätes zur Geschwindigkeitskontrolle auf die Blendung des Fahrers zu ermitteln [132].

## 5.2.2 Durchführung der Messungen

Die Ergebnisse von Blendungstests, insbesondere bei der Abfrage der subjektiven Beeinträchtigung durch Blendung, können stark von der angewandten Fragestellung und Vorgehensweisen abhängen. Im Folgenden werden die zur Anwendung gekommenen Methoden kurz erläutert.

### Ermittlung der Schwellenleuchtdichtedifferenz

Um den physiologischen Einfluss der Blendlichtquelle messen zu können, wird der Leuchtdichtekontrast zwischen projiziertem Landoltring und dessen Hintergrund bestimmt, bei dem der Proband die Orientierung des Ringes gerade noch erkennen kann. Dabei wird die Leuchtdichte schrittweise herabgesetzt, bis die Öffnung nicht mehr richtig erkannt wird.



**Abbildung 33:** Messungen zur Ermittlung der Schwellenleuchtdichtedifferenz  
Exemplarische Leuchtdichteaufnahme zur Bestimmung der Schwellenleuchtdichtedifferenz, rechts im Bild: Projektionsfläche mit Sichtziel, links: Blendquelle

Die Leuchtdichte, die während der letzten richtig erkannten Position eingestellt war, wird dann zur Ermittlung der Schwellenleuchtdichtedifferenz als auch des Kontrastes nach Weber verwendet.

In den Leuchtdichteaufnahmen (vgl. Abbildung 33) sind aufgrund der hohen Dynamiken in der Leuchtdichte Überstrahlungen zu erkennen. Diese Effekte wirken sich auch auf die Pixel des Sichtzieles aus, welches eigentlich homogen beleuchtet ist.

Die Größe des Sehzeichens wie auch der Abstand zur Testperson (50 m) oder der Betrachtungswinkel wird nicht verändert. Abstand und Betrachtungswinkel des Sichtzieles entsprechen der Position von möglichen Hindernissen auf der Fahrbahn und einer Sichtweite, die von der Mehrzahl der gängigen Scheinwerfer unter Normeinstellung erreicht wird. Die Größe des Sichtzieles ( $\alpha = 6^\circ$ ) erlaubt es, den Einfluss der Sehschärfe gering zu halten und die auftretenden Effekte größtenteils auf die Leuchtdichtedifferenz zurückzuführen.

---

### Messung der Blendbeleuchtungsstärke

---

Die Blendbeleuchtungsstärke wurde auch im Folgenden über die beiden fest montierten Beleuchtungsstärkemesser durch den Testleiter per WLAN gemessen, nachdem die Kontrastschwelle bestimmt wurde. Während jeder Messung wird außerdem die Beleuchtungsstärke gemessen, die nicht durch die Blendquellen verursacht wird. Dieser Anteil wird später von den gemessenen Blendbeleuchtungsstärken subtrahiert.

---

### Bestimmung der psychologischen Blendung

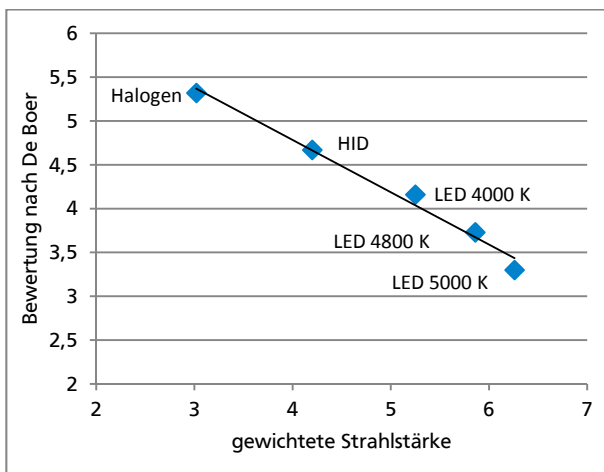
---

Nachdem eine neue Neigung eingestellt wurde, werden die Testpersonen zunächst nach dem Blendungseindruck gefragt. Dabei sollen sie die Einschätzung anhand der DeBoer-Skala quantifizieren. Danach werden Sie gebeten, die psychologische Blendung durch die Position eines kontinuierlich verschiebbaren Reglers einzustellen. Die Reglerposition wird dann per WLAN vom Testleiter abgerufen und automatisch mit Blendbeleuchtungsstärke und DeBoer-Bewertung protokolliert. Die DeBoer-Skala

wird den Probanden anhand der Abbildung 30 übersetzt und erläutert. Zur kontinuierlichen Bewertung wird lediglich gesagt, dass eine Bewertung mit „0“ „keiner Beeinträchtigung“ entspricht und der Wert „100“ „unerträglicher“ Blendung. Es ist daher zunächst zu klären, ob die Bewertung „50“ mit der Aussage „gerade zulässig“ auf der DeBoer-Skala vergleichbar ist. Dazu werden die Ergebnisse beider Messarten in 5.3.1 einander gegenüber gestellt.

### Bestimmung des Einflusses der Strahlungsspektren (Lichtfarbe)

Der Einfluss der Strahlungsspektren wird in einem Blendabstand von 50 m getestet. Dazu werden an dem Rack am Blendfahrzeug drei Scheinwerferpaare installiert. Neben dem schon erwähnten HID-System aus dem Audi A6, finden ein LED-System eines Audi R8 und ein Halogensystem aus einem Opel Vectra Anwendung. Alle drei Scheinwerferpaare sind Projektionssysteme, um eine maximale Vergleichbarkeit zu gewährleisten.



**Abbildung 34:** Spektrale Abhängigkeit der psychologischen Blendung

Beobachtete Korrelation zwischen der psychologischen Blendung und der mit der Empfindlichkeitsfunktion der kurzwelligen Zapfen gewichteten Blendbestrahlungsstärke (SIVAK et al.)

Bisherige Untersuchungen aus den USA legen eine starke Abhängigkeit der psychologischen Blendung vom Blaugehalt des Spektrums nahe, während die physiologische Blendung nicht beeinträchtigt wird. So berichtet SIVAK [133] von höheren Blendbewertungen, je höher der Blauanteil einer Lichtquelle ist. Dieses Phänomen wird mit dem möglichen Einfluss der Sensitivität der blauen Zapfen auf das Blendungsempfinden begründet.

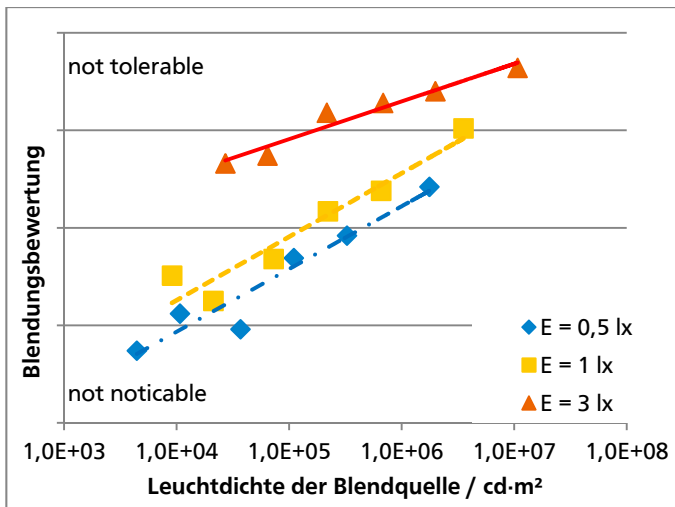
Ein exaktes Modell für diese Sensitivität wird nicht geliefert, jedoch wird eine Korrelation der Blendbewertung mit der gewichteten Bestrahlungsstärke angegeben. Dieses ist die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke, gewichtet mit der Empfindlichkeitsfunktion der blauen Zapfen. Fraglich bleibt, ob

eine solche Korrelation nicht auch für andere Zapfenarten nachweisbar wäre.

VAN DERLOFSKE gibt dagegen eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit unter Beleuchtung mit hohem Blaugehalt als Vorteil an. Er und seine Mitautoren haben verschiedene Quellen hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit und -zuverlässigkeit unter peripheren und fovealen Sichtbedingungen getestet [134].

RAPHAEL [135] und VÖLKER [136] folgerten aus ihren Untersuchungen, dass die Leuchtdichte einen wesentlichen Einfluss auf die gefühlte Blendung hat, einen Einfluss der Lichtfarbe haben sie nicht untersucht. Sowohl VÖLKER als auch LOCHER in [137] weisen ausdrücklich darauf hin, dass Leuchten mit einem Farbort nahe dem Unbuntpunkt bei ansonsten gleichen photometrischen Eigenschaften physiologische Vorteile aufweisen.

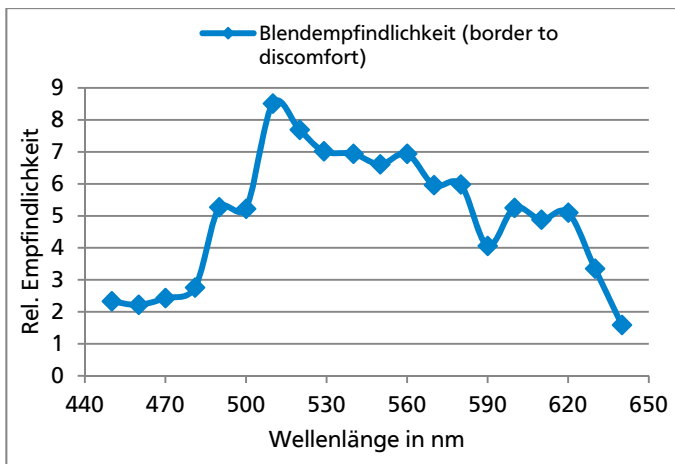
LOCHER hat außerdem nachgewiesen, dass richtig eingestellte Scheinwerfer unabhängig von der verwendeten Technologie der Lichterzeugung keine signifikanten Unterschiede in der physiologischen Blendung hervorrufen. Allerdings wurde in dieser Untersuchung die Blendbeleuchtungsstärke nicht variiert, so dass keine allgemeinen Aussagen über blendungstechnische Vor- und Nachteile einer Technologie getroffen werden können.



**Abbildung 35:** Abhängigkeit des Blendempfindens von der Leuchtdichte bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge nach RAPHAEL

unter Einbeziehung von LED-Systemen im Prototypenstadium weisen auf die Unabhängigkeit der Blendempfindlichkeit der Testpersonen von der Lichtfarbe hin [139].

SCHILLERS Untersuchungen fanden wie die von Locher unter praxisnahen Bedingungen statt und sind daher unmittelbar auf den Verkehr übertragbar. Einziger Nachteil der Untersuchung ist die fehlende Fahraufgabe der Probanden. Den Einfluss dieser zu ermitteln ist Gegenstand weiterer Untersuchungen am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt.



**Abbildung 36:** Abhängigkeit des Blendempfindens von der Wellenlänge bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge nach FEKETE. Blendwinkel  $\Theta = 0^\circ$ .

SCHILLER untersuchte analog, wie gut mehrere Fahrzeuge gleicher Baureihe wahrgenommen wurden, die mit verschiedenen Lichtquellen ausgerüstet waren [138]. Er konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen hinsichtlich der psychologischen Blendung der einzelnen Systeme erkennen. Auch weitere Veröffentlichungen unter

FEKETE hat einen allgemeineren Ansatz gewählt und die spektrale Empfindlichkeit des Menschen in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Lichtquelle aufgenommen. Dabei zeigt sich, dass die vermessenen Personen tatsächlich für blaue Strahlung empfindlicher reagieren. Die Untersuchung wurde unter monochromatischer Blendung unter  $2^\circ$  Sehwinkel durchgeführt [140].

Gemeinsam ist allen Untersuchungen, dass sie nicht mit realen Scheinwerfern durchgeführt wurden oder die Blendbeleuchtungsstärke dieser Scheinwerfer nicht verändert wurde. Ebenso sind viele Ergebnisse unter Laborbedingungen oder in Lichttunneln entstanden. Es bleibt also nachzuweisen, dass die beobachteten Effekte auch unter realen Bedingungen festgestellt werden können.

Die Untersuchungen von LOCHER und SCHILLER werfen die Frage auf, ob die Untersuchungen, die an amerikanischen Instituten durchgeführt worden sind, auf den Verkehr in Europa tatsächlich übertragbar sind.





**Abbildung 37: Scheinwerferrack mit 3 verschiedenen SW-Technologien**

wird.

Das mit dem Rack ausgerüstete Fahrzeug steht in einem Abstand von 50 m zum Auto mit den Probanden auf der Gegenfahrbahn. Wie in den vorher beschriebenen Tests muss von ihnen auch hier ein Sichtziel in 50 m Abstand vor dem eigenen Fahrzeug erkannt werden. Das Sichtziel besteht wiederum aus einem Landoltring mit 30° Sehwinkel. Die zu erkennende Aussparung hat also eine Größe von  $\alpha = 6'$ .

Der Testleiter kann die Neigung des Racks sowie den Kontrast des Sichtzieles direkt verstellen. Außerdem ist er in der Lage, nach Ermittlung der Kontrastschwelle einer Testperson, per WLAN eine Leuchtdichteaufnahme zu starten und die Beleuchtungsstärke am Auge der Probanden zu messen. Ebenfalls wird die kontinuierliche Blendbewertung aufgenommen, die wiederum durch die Testpersonen auf dem bereits beschriebenen Fader eingestellt wird. Alle Parameter werden automatisch protokolliert.

---

### Testpersonen

---

An den Tests haben 10 Personen teilgenommen. Alle Teilnehmer waren farbnormalsichtig und wiesen volle Sehkraft auf. Personen, die eine Sehhilfe benötigten, trugen diese während des Tests. Die Altersstruktur reichte von 25 bis 45 Jahre.

## 5.3 Ergebnisse

Die ermittelten Messwerte werden im Folgenden dargestellt und mit den Ergebnissen von vorhergehenden Arbeiten verglichen. Zunächst wird die Vergleichbarkeit der Messmethoden untersucht. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen werden dargestellt und Vergleiche mit den Ergebnissen anderer Studien gezogen.



### 5.3.1 Vergleichbarkeit von Blendungsbewertungen

Zunächst soll überprüft werden, ob die kontinuierliche, prozentuale Blendungsbewertung mit der neunstufigen DeBoer-Bewertung vergleichbare Ergebnisse liefert. Dazu werden beide Bewertungen für je eine Blendbeleuchtungsstärke und Entfernung in einem Diagramm abgetragen (vgl. Abbildung 38).

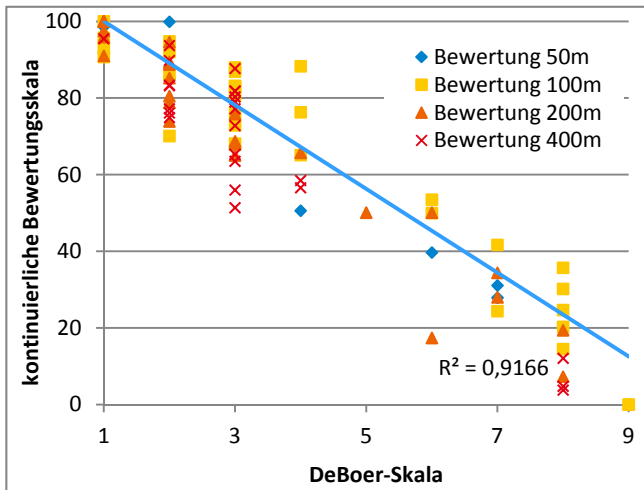


Abbildung 38: Abhängigkeit zwischen kontinuierlicher und DeBoer-Bewertung mit Regressionsgeraden

Dem Graphen kann entnommen werden, dass eine hohe Korrelation zwischen der DeBoer-Bewertung und der kontinuierlichen Bewertung besteht. Aus dem Graphen geht auch hervor, dass Probanden dazu neigen, die Extrema einer Bewertungsskala eher nicht zu verwenden. Gleiches gilt für „Quasi-Grenzfälle“, wie sie durch die Bezeichnung „gerade zulässig“ suggeriert wird.

Diesen Nachteil weist die kontinuierliche Bewertung nicht auf. Wesentlich häufiger werden Reglerpositionen gewählt, die einer Blendungsbewertung von 1, 5, oder 9 entsprechen. Insofern kann hier ein empfindungsgetreueres Abbild der Sinneseindrücke der Testpersonen erwartet werden. Außerdem eignen sich die Bewertungen durch die klassenlose Einteilung besser zur statistischen Weiterverarbeitung und Vergleich mit anderen nicht-diskreten Skalen. Im Folgenden werden daher die kontinuierlichen Bewertungen als Grundlage herangezogen.

### 5.3.2 Physiologische Blendung auf kurzen Entfernungen

Die physiologische Blendung ist ein Maß für die tatsächliche Beeinträchtigung einer Testperson durch eine Störlichtquelle bei dem Versuch, ein Sichtziel zu erkennen. Im Straßenverkehr gibt es dabei mehrere wesentliche Einflussgrößen. Dabei sind bei gerader Streckenführung der Abstand und die Blendbeleuchtungsstärke die entscheidenden Merkmale. Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes ist für die physiologische Blendung weniger entscheidend, zumindest solange der Farbbort des Lichts sich im ECE-Weißbereich befindet, s. bspw. [141].

Zunächst ist festzustellen, dass die physiologische Beeinträchtigung bei der Erkennung der Orientierung des Landoltringes sich im betrachteten Bereich linear zur Blendbeleuchtungsstärke verhält. Insofern sind die Ergebnisse konsistent mit den Beobachtungen HOLLADAYS, der bereits 1926 folgenden Zusammenhang zwischen Blendbeleuchtungsstärke  $E_{BL}$ , dem Blendwinkel  $\Theta$  und der in seinem Modell für die physiologische Blendung verantwortlichen Schleierleuchtdichte  $L_S$  herleitete [142]:

$$L_S = K \cdot E_{BL} \cdot \Theta^{-n}. \quad \text{Gl. 5-1}$$

Der Exponent wurde von HOLLADAY mit  $n = 2$  angegeben. Der Faktor  $K$  hängt von der jeweiligen Testperson ab und ist ein Maß für deren individuelle Blendempfindlichkeit.

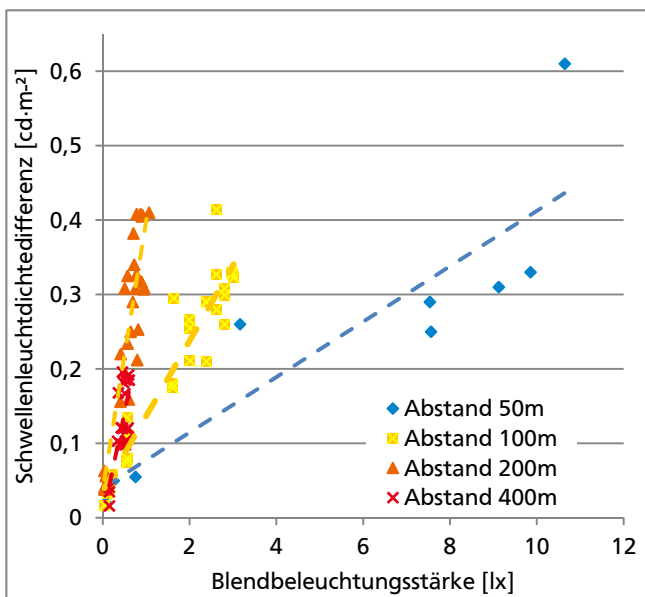
Die Schleierleuchtdichte führt zu einer Erhöhung des zur Erkennung notwendigen Schwellenleuchtdichteunterschiedes  $\Delta L$  zwischen der Leuchtdichte  $L_O$  eines Sichtzieles und der Leuchtdichte  $L_U$  von dessen Umgebung. Eine weitere Maßzahl, der Weberkontrast  $C_W$ , ist aufgrund ihres Bezuges auf die Umgebungsleuchtdichte bei Untersuchungen über mehrere Dekaden der Leuchtdichte unter Umständen die aussagekräftigere Größe.

$$\Delta L = L_O - L_U \quad \text{Gl. 5-2}$$

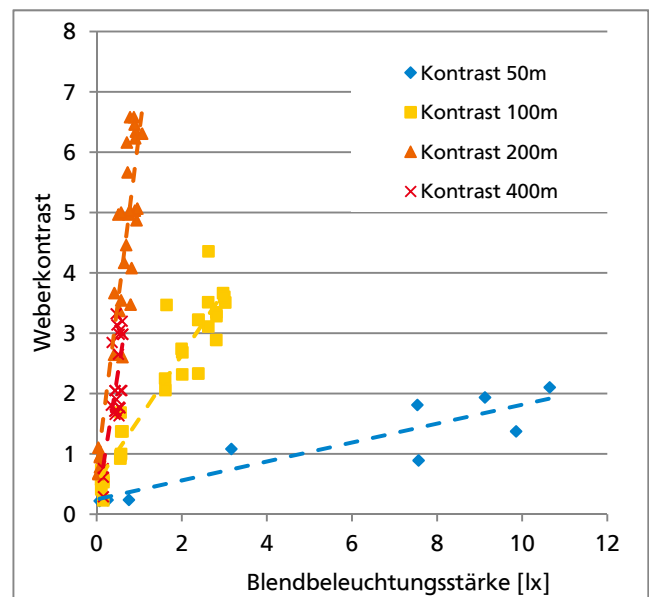
$$C_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad \text{Gl. 5-3}$$

HOLLADAY gibt in seiner Arbeit für die Schleierleuchtdichte einen Exponenten  $n = 2$  an. Die im Freifeldversuch ermittelten Werte für die Erhöhung der Schwellenleuchtdichtedifferenz legen jedoch eine geringere Abhängigkeit vom Blendwinkel nahe ( $n = 1,8$ ). Zu erwähnen bleibt, dass die Größe der Lichtquelle in keinem Modell Einfluss auf die Blendung hat. Diese Tatsache wird (bei gleicher Blendbeleuchtungsstärke) von verschiedenen Studien bestätigt, siehe etwa BULLOUGH [143].

In einem Bereich von Entfernungen über 200 m hat die Änderung des Winkels offensichtlich weit geringeren Einfluss auf die Schwellenleuchtdichteerhöhung, was sich in einer wenig veränderten Steigung der zugehörigen Gerade in Abbildung 39 äußert.



**Abbildung 39:** Abhängigkeit zwischen Schwellenleuchtdichtedifferenz und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung



**Abbildung 40:** Abhängigkeit zwischen Weberkontrast des Sichtzieles und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung

Auch die im Laborversuch hergeleiteten Zusammenhänge zwischen Blendbeleuchtungsstärke, Blendwinkel und Schwellenleuchtdichteerhöhung von Schmidt-Clausen und Bindels beschreiben die gefundenen Zusammenhänge hinreichend. Damit ist die Übertragbarkeit der im Labor gefundenen Zusammenhänge aufgezeigt.

Es ist in diesem Zusammenhang interessant, dass die Abhängigkeit des Weberkontrastes vom Blendwinkel, wie in Abbildung 40 dargestellt, noch wesentlich stärker ist, als die Abhängigkeit des Leucht-

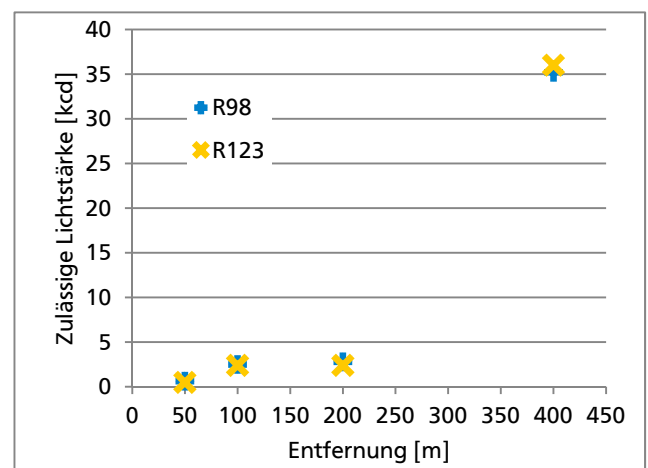
dichteunterschiedes vom Blendwinkel. Es scheint also während der Messungen zu Schwankungen in der Hintergrundleuchtdichte der Leinwand gekommen zu sein.

Möglicherweise ist dies durch Rückreflektionen des Scheinwerferlichtstromes des Blendfahrzeuges durch die Fahrbahnoberfläche bei kleinen Blendentfernungen zu erklären.

### 5.3.3 Folgerungen aus den Blendversuchen mit geringem Abstand

Die ermittelten physiologischen Blendungen für die unterschiedlichen Entfernungen können als Grundlage für eine Abschätzung von Höchstlichtstärken dienen, die dem Gegenverkehr zugemutet werden können, ohne dass eine Überschreitung desjenigen Blendungsniveaus stattfindet, wie es durch die Festlegung des Blendwertes B50L in den derzeitigen ECE-Regelungen R98 bzw. R123 vorgeschrieben wird. Die beiden Regelungen unterscheiden sich in der Hinsicht voneinander, dass die R98 bei Abblendlicht einen Wert von 0,5 lx im Punkt B50L (Messentfernung 25 m) toleriert, während dies beim „Country Light“ (Class C) der Regelung R123 nur 0,4 lx pro Scheinwerfer sind. Abbildung 41 gibt die aus den ermittelten Schwellenleuchtdichteunterschieden ermittelten maximalen Lichtstärken bei den entsprechenden Entfernungen an. Die Werte wurden gefunden, indem die zur Erkennung nötige Schwellenleuchtdichte, die sich bei Abblendlicht in 50 m Entfernung ergibt, als Standard definiert wird und die Lichtstärken ermittelt werden, die bei den übrigen Entfernungen dieselben Beeinträchtigungen hervorrufen.

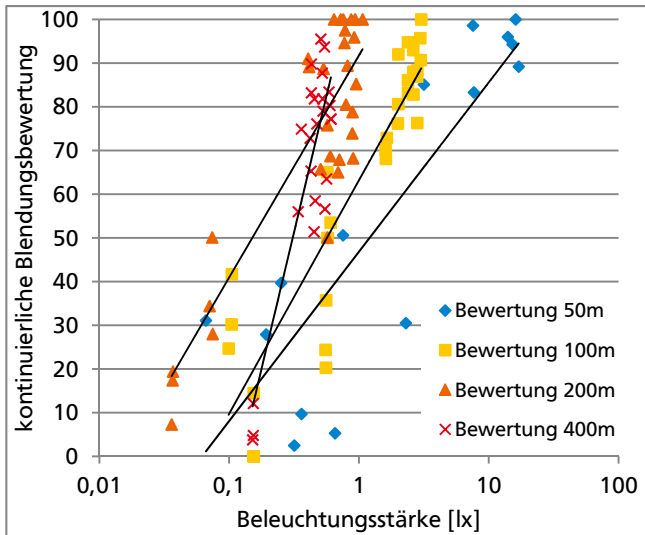
Interessant ist ebenfalls die schon erwähnte Abnahme der Änderung der Blendempfindlichkeit bei kleinen Blendwinkeln (großer Begegnungsabstand). Die gängigen Bewertungsformeln stoßen hier an ihre Grenzen. Um zu erkunden, welchen Einfluss eine weitere Erhöhung der Blendentfernung hat, wurden weitere Tests durchgeführt. Zunächst sollen jedoch die psychologischen Einflüsse der Blendung im Nahbereich diskutiert werden.



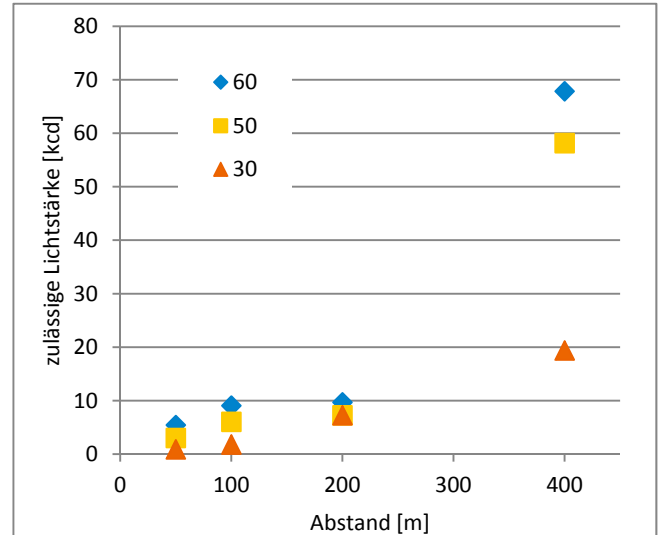
**Abbildung 41:** Maximal zulässige Lichtstärken in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand. Die Werte sind so gewählt, dass die physiologische Beeinträchtigung nicht überschritten wird, die im ECE-Messpunkt B50L maximal zulässig ist.

### 5.3.4 Psychologische Blendung auf kurzen Entfernungen

In Abgrenzung zur physiologischen Blendung, bei der eine messbare Beeinträchtigung der Sehfunktion auftritt, beschreibt die psychologische Blendung nur eine subjektiv empfundene Störung. Viele Studien belegen eine Abhängigkeit dieser Blendungsart von der Lichtfarbe (vgl. etwa [SIV04]).



**Abbildung 42:** Abhängigkeit zwischen kontinuierlicher Blendungsbewertung und der Blendbeleuchtungsstärke und Begegnungsentfernung



**Abbildung 43:** Maximal zulässige Lichtstärken in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand um die angegebene Blendbewertung nicht zu überschreiten.

Wie in Abbildung 42 ersichtlich, ergeben sich für die Blendungsbewertung keine Ergebnisse, die mit einer einfachen linearen Regression zu beschreiben sind. In dem betrachteten Wertebereich lassen sich die Ergebnisse in guter Näherung durch eine logarithmische Funktion beschreiben.

Wie zu erwarten, ergibt sich auch hier eine starke Abhängigkeit der Blendungsbewertung vom Blendwinkel  $\Theta$ . Je kleiner dieser ist, d.h. je weiter das blendende Fahrzeug entfernt ist, desto empfindlicher reagieren die Testpersonen auf Blendungseinfluss. Dies lässt sich daran ablesen, dass sich die Regressionsgeraden in Abbildung 42 mit zunehmendem Abstand weiter nach links verschieben. Ein definiertes Niveau der Blendungsbewertung (z. B. Bewertung 30, 50 oder 60) wird daher schon bei kleineren Beleuchtungsstärken erreicht.

Auch für die psychologische Blendung lässt sich erkennen, dass die Empfindlichkeit ab einer Entfernung von 400 m nicht mehr ansteigt. Dies wird dadurch deutlich, dass die Regression zwar steiler verläuft, aber die Höchstwerte bei in etwa denselben Beleuchtungsstärken erreicht werden, wie bei einer Blendung aus 200 m. Außerdem wird der Höchstwert der Bewertung nicht mehr erreicht. Auch werden geringere Beleuchtungsstärken nicht mehr als so störend empfunden, wie noch bei einer Entfernung von 200 m.

Diese Beleuchtungsstärken, die zu einem definierten psychologischen Blendungsniveau führen, lassen sich je nach Abstand in die zugehörigen Lichtstärken umrechnen. Aus Abbildung 43 sind die Lichtstärken ersichtlich, die den jeweiligen Abständen in unserer Studie zu der angegebenen Bewertung der psychologischen Blendung führen.

### 5.3.5 Einfluss der Strahlungsspektren

Der Einfluss der Lichtfarbe auf die physiologische Blendung wird wiederum über die Erhöhung des Leuchtdichteunterschiedes und des Weber-Kontrastes an der Wahrnehmungsschwelle in einer weiteren Studie ermittelt [144]. Für jede Testperson dauert dieser Vorgang etwa 3 Stunden, um alle Scheinwerferpaare mit unterschiedlichen Neigungswinkeln bewerten lassen zu können. Ein Einfluss von Müdigkeit kann daher nicht ausgeschlossen werden. Die Sehleistung nimmt bei keinem Probanden mit der verbrachten Zeit signifikant ab.

Da die interpersonellen Streuungen in der Sehleistung wie auch in der Blendempfindlichkeit teils gravierend sind, muss der Einfluss der Blendung für jede Person einzeln ermittelt werden. Dabei wird mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS für jede Person und für jedes Scheinwerferpaar eine lineare Regression zwischen der Blendbeleuchtungsstärke und dem gemessenen Schwellenleuchtdichteunterschied bzw. Weber-Kontrast berechnet. Der verwendete Algorithmus bedient sich dabei der Methode der kleinsten Quadrate. Das Ergebnis ist eine lineare Funktion der Art

$$\Delta L = b_{0,L} + b_{1,L} \cdot E_B \quad \text{Gl. 5-4}$$

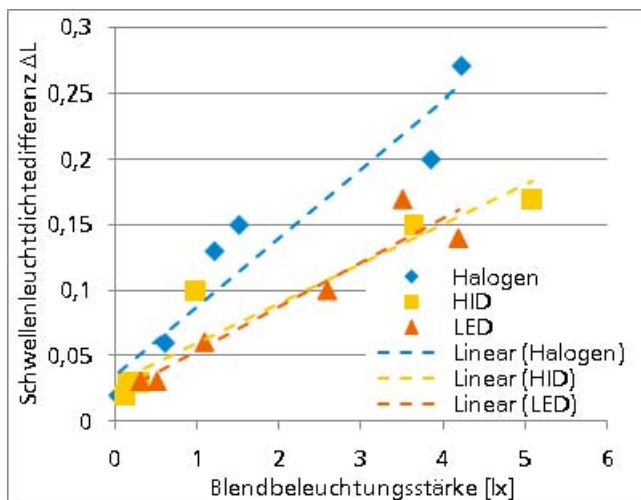
bzw.

$$C_W = b_{0,C} + b_{1,C} \cdot E_B. \quad \text{Gl. 5-5}$$

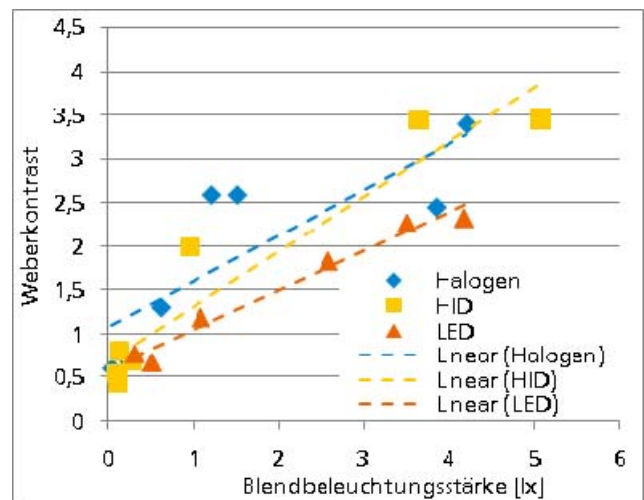
Mit  $\Delta L$ : Schwellenleuchtdichtedifferenz  
 $C_W$ : Weberkontrast

Für die ermittelten beiden Parameter lassen sich Konfidenzintervalle angeben, in denen die Größen der Grundgesamtheit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wirklich liegen. Dazu muss allerdings die Grundgesamtheit dieselbe Wahrscheinlichkeitsverteilung wie die Stichprobe aufweisen.

Eine unterschiedliche Blendempfindung oder –empfindlichkeit für verschiedene Lichtquellen lässt sich für eine Person dann vermuten, wenn sich diese Konfidenzintervalle für die verschiedenen Quellen signifikant unterscheiden. Kann dieser Unterschied bei einer signifikanten Mehrheit der Probanden festgestellt werden, so kann eine generelle Differenz unterstellt werden.



**Abbildung 44:** Messpunkte und Regression der Abhängigkeit von  $\Delta L$  von der Blendbeleuchtungsstärke für Testperson Nr. 8



**Abbildung 45:** Messpunkte und Regression der Abhängigkeit von  $C_W$  von der Blendbeleuchtungsstärke für Testperson Nr. 8

Abbildung 44 zeigt exemplarisch die sich ergebenden Kennlinien für eine ausgewählte Testperson. Dabei sind die aufgenommenen Messpunkte und die sich daraus ergebenden Regressionsgeraden eingezeichnet. Dargestellt ist der nötige Schwellenleuchtdichtekontrast, um die Orientierung der Öffnung eines  $0,5^\circ$  großen Landoltringes gerade noch korrekt zu erkennen.

Deutlich ist zu sehen, dass die Messwerte für HID und LED kaum voneinander abweichen. Nur die Werte für die eine Halogenblendquelle unterscheiden sich etwas. Werden die Koeffizienten aller

Testpersonen gegeneinander verglichen, so zeigt sich, dass von den vermessenen Personen zwei signifikant stärker durch das Halogenlicht geblendet wurden, als durch die anderen beiden Lichtquellen. Zwei weitere Testpersonen reagierten außerdem signifikant sensitiver auf Halogenlicht als auf LED-Strahlung. Der Unterschied zum HID-Licht war bei diesen Probanden aber nicht signifikant. Kein Teilnehmer reagierte sensitiver auf LED- oder HID- als auf Halogenlicht.

**Tabelle 14: Rangsummen und 1,96- $\sigma$ -Quantile für die Analyse nach Schwellenleuchtdichtedifferenz**

Rangsummen			Quantile	
Halogen	HID	LED	0,025	0,975
12	16	20	10,93	21,06

Um testen zu können, ob es einen deutlichen Trend in der Sensitivität der Probanden gegen eine der Lichtquellen gibt, wird wiederum der bereits in Kapitel 4.2.4 ausführlich erläuterte Rangfolgentest eingesetzt. Die vollständige Auswertung der Ergebnisse der Regressionsanalyse kann im Anhang in Tabelle 24 eingesehen werden. Tabelle 14 fasst das Ergebnis zusammen. Es ist ersichtlich, dass keine Rangsumme signifikant vom Mittelwert abweicht, also außerhalb des durch die angegebenen Quantile abge-

grenzten Bereiches liegt.

Neben der Schwellenleuchtdichtedifferenz  $\Delta L$  kann das Sichtziel auch durch den Objektkontrast beschrieben werden. Dies ist bei wechselnden Umfeldleuchtdichten zwingend geboten. Die Umfeldleuchtdichte um das Sichtziel herum ist in diesem Versuch zwar weitestgehend konstant, kann aber unter Umständen durch wechselnde Bewölkung und Mondlicht leicht variieren. Eine Berechnung des Weberkontrastes kann also sinnvoll sein.

In Abbildung 45 (oben) ist daher die Abhängigkeit des Weberkontrastes von der Blendbeleuchtungsstärke für dieselbe wie oben Testperson dargestellt. Da sich die Regressionsgeraden weiter angenähert haben, ist davon auszugehen, dass der erhöhte Schwellenleuchtdichtekontrast für die Messung mit Halogenblendquelle durch Streulicht (evtl. durch Mondschein) hervorgerufen wurde.

Die lineare Regression wurde wie für die Schwellenleuchtdichtedifferenz  $\Delta L$  durchgeführt. Die Ergebnisse für jede einzelne Testperson können in Tabelle 25 im Anhang eingesehen werden.

**Tabelle 15: Rangsummen und 1,96- $\sigma$ -Quantile für die Analyse nach Weberkontrast**

Rangsummen			Quantile	
Halogen	HID	LED	0,025	0,975
20	13	15	10,93	21,06

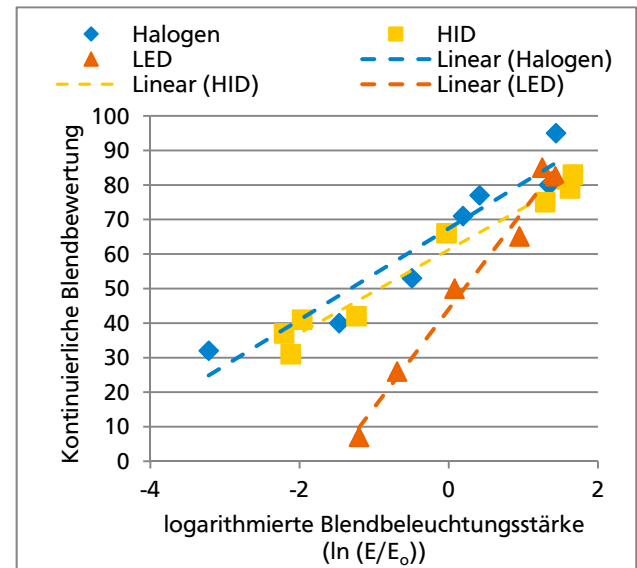
Werden die Ergebnisse nach dem bekannten Rangfolgeverfahren ausgewertet, ergeben sich die in Tabelle 15 zusammengefassten Werte. Auch in diesem Fall lässt sich keine statistisch signifikante Abhängigkeit der physiologischen Blendung von der Lichtquelle feststellen. Wie gering die Unterschiede zwischen den einzelnen Blendquellen sind, lässt sich auch daran erkennen, dass bei einer Auswertung nach  $\Delta L$  Halogenscheinwerfer am schlechtesten abschneiden, die bei einer Analyse nach dem Weberkontrast jedoch die besten Werte liefern.

Die gezeigten Ergebnisse bestätigen die Studien wie z.B.[145], denen zufolge die Lichtfarbe kaum Einfluss auf die physiologische Blendwirkung von Scheinwerfern hat. Wie oben angegeben, wird derzeit jedoch stark diskutiert, in wieweit die psychologische Blendung von der Lichtfarbe beeinflusst wird. Die Diskussion ist im Zusammenhang mit der Einführung der HID-Scheinwerfer aufgekommen und es kann erwartet werden, dass sie sich mit dem flächendeckenden Einsatz von LED-Lichtquellen mit hoher Farbtemperatur wiederholen wird.



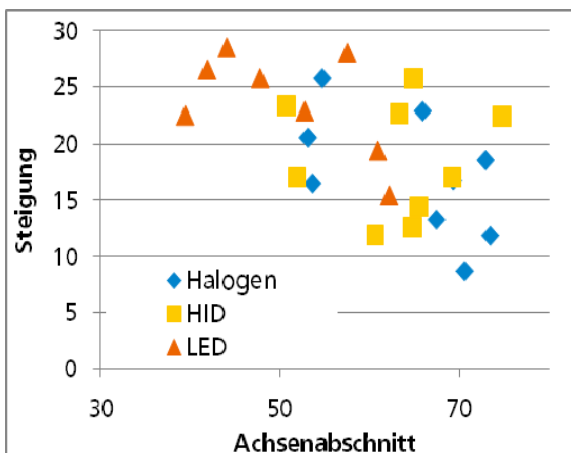
Daher wird während der Versuche auch der subjektive Eindruck der Testpersonen von der Stärke der Beeinträchtigung abgefragt. Das Vorgehen entspricht der Beschreibung in den vorhergehenden Kapiteln unter Verwendung der kontinuierlichen Blendungsskala.

Da die Wahrnehmung der Beeinträchtigung der Testpersonen untereinander wiederum stark differiert, werden die Ergebnisse wiederum für jedes Subjekt einzeln ausgewertet. Die Tatsache, dass der Zusammenhang zwischen Blendempfindung und Blendbeleuchtungsstärke logarithmischer Natur ist, macht es nötig, die Abszisse zu logarithmieren, um eine lineare Regression anwenden zu können. Das weitere Vorgehen entspricht dann dem der Analyse der physiologischen Auswirkungen.



**Abbildung 46:** Abhängigkeit der psychologischen Blendung von der logarithmierten Blendbeleuchtungsstärke ( $E_0=1\text{lx}$ ) für eine Testperson

Abbildung 46 zeigt für die bereits oben angegebene Testperson den bereits beschriebenen Zusammenhang. Für diese Testperson ist deutlich zu sehen, dass die LED Scheinwerfer als weniger blendend empfunden werden. Auch diese Regressionen können durch ihre Steigung und eine Konstante beschrieben werden. Diese Konstante ist in diesem Fall der Wert der Blendbewertung bei 1 lx (Achsenabschnitt der logarithmierten Darstellung).



**Abbildung 47:** Achsenabschnitts-Steigungs-Diagramm für jede durchgeführte Regression

Diese Analyse wird nun für alle Testpersonen einzeln durchgeführt und die Steigungen und Achsenabschnitt fallweise nach Lichtart bestimmt. Um das Ergebnis sinnvoll visualisieren zu können, eignet sich ein Achsenabschnitts-Steigungsdiagramm, in dem für jede Regression die jeweiligen Werte eingetragen sind.

Abbildung 47 zeigt ein solches Diagramm. Jede Regression ist als Punkt im Koordinatensystem dargestellt. Dabei ist der Achsenabschnitt auf der Abszisse und die Steigung der Regressionsgeraden auf der Ordinate abgetragen. Es fällt auf, dass die Punkte, die Messungen von HID und Halogenscheinwerfern repräsentieren, in etwa im gleichen Bereich liegen, also ein eigenes Cluster bilden.

Die Punkte, die zu Regressionen gehören, die aus Messungen mit LED-Scheinwerfern stammen, weisen deutlich geringere Achsenabschnitte und höhere Steigungen auf.

Dies bedeutet, dass mindestens bei geringen Beleuchtungsstärken unter 1 lx, LEDs Vorteile als Lichtquelle für Scheinwerfer haben können, was die psychologische Blendwirkung betrifft. Fraglich ist, ob diese Unterschiede tatsächlich signifikant sind. Dazu werden die Koeffizienten der linearen Regressionen auf signifikante Mittelwertunterschiede untersucht. Das Ergebnis fasst Tabelle 16 zusammen. Es fällt auf, dass sich sowohl Achsenabschnitt als auch die Steigung der Bewertung des durch LED erzeugten Lichtes höchst signifikant von den anderen Lichtquellen unterscheiden.



Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die LED-Scheinwerfer unter den gegebenen Bedingungen tatsächlich signifikant besser, das heißt als weniger blendend, beurteilt werden. Dieses Ergebnis widerspricht den amerikanischen Studien stark, lässt sich aber mit den oben zitierten Ergebnissen von FEKETE et al. und SCHILLER gut vereinbaren, denn wenn die verschiedenen Lichtquellen mit der von FEKETE beschriebenen Empfindlichkeitsfunktion gewichtet werden und auf eine einheitliche photopische Beleuchtungsstärke bezogen werden, ergibt sich der sogenannte psychologische Blendfaktor (PBF) einer Lichtquelle. Diese Faktoren sind in Tabelle 17 für verschiedene Lichtquellen mit der entsprechenden Farbtemperatur (*engl.*: correlated colour temperature, CCT) aufgeführt. Es fällt auf, dass die LED tatsächlich einen leicht geringen PBF aufweist, als alle anderen Lichtquellen. Aus analytischer Sicht ist das Ergebnis der durchgeführten Tests also nicht widersprüchlich. Fraglich ist jedoch, warum die Studien des UMTRI und des Lighting Research Center zu solch unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Die Methodologie aller Versuche unterscheidet sich nicht so stark, dass die Unterschiede hieraus zu erklären wären.

Zusammenfassend kann zum Einfluss der Lichtfarbe gesagt werden, dass ein höherer Blauanteil nicht zu Nachteilen bei der Blendung führt. Voraussetzung ist ein ECE-konformer Farbtort der Strahlung.

**Tabelle 16: Rangsummen und 2,58- $\sigma$ -Quantile**

		Mittelwert	Konfidenzintervall (99%)	
Halog.	Achsenabschnitt	64,5	61,8	67,2
	Steigung	17,2	15,5	19,0
LED	Achsenabschnitt	50,8	44,7	56,9
	Steigung	23,6	20,8	26,5
HID	Achsenabschnitt	62,9	60,4	65,4
	Steigung	18,6	16,9	20,2

**Tabelle 17: Psychologische Blendfaktoren verschiedener Lichtquellen**

Lichtquelle	PBF	CCT
Halogen H7	1,366	3200 K
HID D1 Osram	1,258	4057 K
HID D1 Philips	1,253	4099 K
HID D3 Osram	1,285	4158 K
HID D3 Philips	1,301	4290 K
LED Osram	1,257	4600 K

### 5.3.6 Physiologische Blendung auf große Entfernungen

Aus den oben beschriebenen Erkenntnissen konnten Grenzwerte für die zulässige Blendung von Verkehrsteilnehmern in Abhängigkeit des Begegnungsabstandes ermittelt werden. Allerdings wurde ebenfalls erkannt, dass die gängigen Formeln zur Beschreibung der Blendung (Holladay, CIE etc.) nicht geeignet sind, die Blendung unter großem Begegnungsabstand zu beschreiben. Daher wurde eine zweite statische Versuchsreihe entwickelt, die zum Ziel hatte, die Blendung von automobilen Scheinwerfern auf größere Entfernung zu beschreiben [146].

Große Abstände führen zu einem kleinen Blendwinkel  $\theta$ ; bei einem Begegnungsabstand von 500 m sind dies weniger als  $0,5^\circ$ . Außerdem wird auch die Größe des blendenden Scheinwerfers gering (Sehwinkel  $\alpha \ll 1'$ ). Für eine Standardlinse eines HID-Projektorsystems mit einem Durchmesser von 70 mm ergibt sich auf 400 m ein Sehwinkel von  $\alpha = 0,6'$ , wohingegen dieselbe Lichtquelle auf 100m noch unter einem Sehwinkel von  $\alpha = 2,4'$  wahrgenommen wird.

Ein geringer Blendwinkel wird in der Regel zu einer größeren Blendung führen, denn die Lichtquelle rückt für den Beobachter „näher“ an die Sehaufgabe heran. Dies wird in der gängigen Theorie dadurch modelliert, dass der Blendwinkel in den Gleichungen im Nenner steht.

Je nach Gewichtung führt diese Art der Modellierung zu Ergebnissen, die der alltäglichen Beobachtung widersprechen, dass die Blendung des Gegenverkehrs mit zunehmender Entfernung kleiner wird. Zunächst sei die Gleichung Holladays diskutiert. Aus

$$L_V = K \cdot \sum E_n \cdot \Theta_n^{-2} \quad \text{Gl. 5-6}$$

folgt mit dem photometrischen Entfernungsgesetz mit Abstand  $d_n$  und Lichtstärke  $I_n$

$$E_n = \frac{I_n}{d_n^2} \quad \text{Gl. 5-7}$$

und mit dem lateralen Versatz  $b$  der Fahrzeuge zueinander

$$\Theta_n = \arctan \frac{b_n}{d_n} \approx \frac{b_n}{d_n} \quad ; (b_n \ll d_n) \quad \text{Gl. 5-8}$$

letztlich

$$L_V = K \cdot \sum \frac{I_n}{d_n^2} \cdot \frac{d_n^2}{b_n^2} = K \cdot \sum \frac{I_n}{b_n^2} \quad \text{Gl. 5-9}$$

Der Index  $n$  steht hier für die  $n$ -te Leuchte. Die Schleierleuchtdichte  $L_V$  würde nach dieser Formel mit abnehmendem Blendwinkel  $\Theta$  quadratisch zunehmen, was zunächst einleuchtend ist, wenn man eine unveränderte Lichtquelle betrachten würde. Im Fall des Straßenverkehrs bleibt die Lichtquelle jedoch nicht unverändert, sondern befindet sich in verschiedenen Entfernungen  $d_n$  vom Beobachter, wodurch die Blendbeleuchtungsstärke  $E_n$  quadratisch abnimmt. Beide Effekte würden sich demnach aufheben, eine Blendquelle im Verkehrsraum würde unabhängig von ihrer Entfernung immer gleich stark blenden; vgl. dazu auch Gl. 5-9, in der die Lichtstärke  $I_n$  und der laterale Versatz  $b$  jeweils konstante Werte sind. In der Realität ist eine Unabhängigkeit von der Entfernung jedoch nicht gegeben, wie die vorangegangenen Untersuchungen bereits gezeigt haben. Das Modell scheint daher ungeeignet, um auf den Verkehrsraum übertragen zu werden.

Im Jahr 2002 hat die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) eine allgemeine Formel zur physiologischen Blendung veröffentlicht (CIE General Disability Glare Equation, [147]). Diese Formel sollte explizit auch geringere Blendwinkel in Betracht ziehen und wurde daher für einen Geltungsbereich von  $0,1^\circ < \Theta < 100^\circ$  angegeben. Außer den schon erklärten Variablen wurden der Pigmentierungsgrad der Augen der Testperson  $p$  und deren Alter  $A$  in die Formel einbezogen.

$$L_V = \sum \frac{10 \cdot E_n}{\Theta^3} + E_n \left( 1 + \left( \frac{A}{62,5} \right)^4 \right) \cdot \left( 5 \frac{E_n}{\Theta^2} + 0,1 \frac{p}{\Theta} \right) + 0,025 p \quad \text{Gl. 5-10}$$

Dennoch ist schon bei erstmaligem Betrachten der Formel zu sehen, dass aufgrund des kubischen Eingangs des Blendwinkels  $\Theta$  in den Nenner des ersten Terms eine noch schlechtere Übereinstimmung der von diesem Modell vorausgesagten Werte mit der Praxis zu erwarten ist. Die CIE-Formel sagt eine höhere Blendung voraus, je größer der Begegnungsabstand ist, da der Nenner durch die dritte Potenz

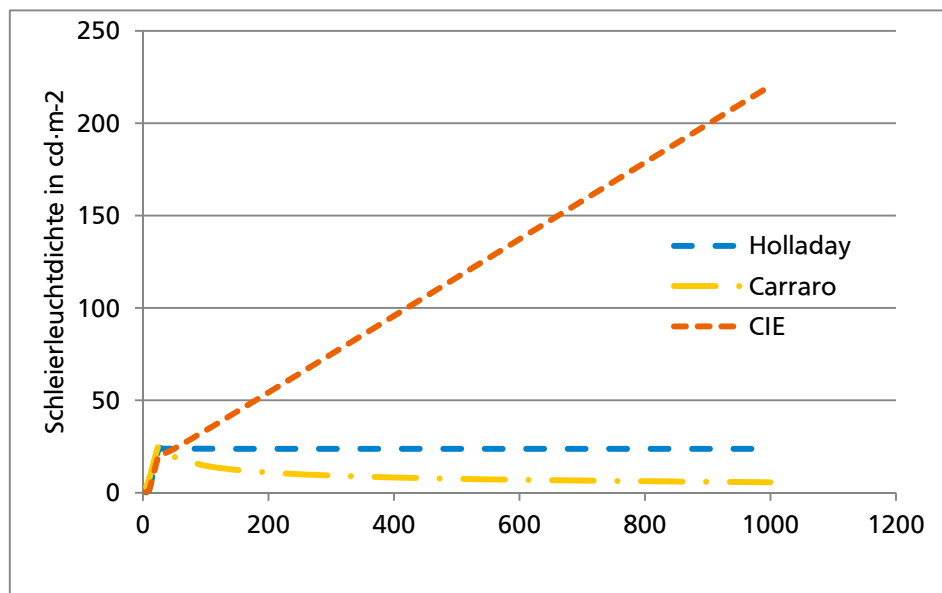
des Blendwinkels mit dem Abstand stärker abnimmt als die Beleuchtungsstärke, die nur quadratisch mit dem Abstand abnimmt. Im Ergebnis führte dies also theoretisch zu einer annähernd proportionalen Zunahme der Blendung mit dem Begegnungsabstand.

Eine in dieser Hinsicht bessere Übertragbarkeit in den Verkehrsraum lässt die Gleichung von CARRARO

$$L_V = K \cdot \sum E_n^{0,58} \cdot \Theta_n^{-0,75} \quad \text{Gl. 5-11}$$

erwarten [148]. In diese geht der Blendwinkel mit einem geringeren Exponenten ein.

Abbildung 48 stellt die Voraussagen aller beschriebenen Modelle für ein Fahrzeug mit Fernlicht dar. Es wird deutlich, dass lediglich das Modell Carraros eine Übereinstimmung mit der wahrgenommenen Realität des Straßenverkehrs liefert. Holladay sagt voraus, dass die Schleierleuchtdichte im Bereich größerer Entfernungen konstant bleibt und die Formel der CIE sagt sogar eine höhere Belastung mit steigender Entfernung voraus.



**Abbildung 48:** Abhängigkeit der psychologischen Blendung von der logarithmierten Blendbeleuchtungsstärke

Bereits die Versuche zur Blendung mit kurzen Begegnungsabständen haben gezeigt, dass die bisherigen, im Laborversuch begründeten Theorien nicht einfach auf den Straßenverkehr übertragen werden können. Dies gilt selbst für den statischen Blendungsversuch.

Daher soll im Folgenden ein vergleichbarer Versuch unter großen Entfernungen durchgeführt werden. Diese Entfernungen waren zunächst durch eine begrenzte Reichweite der genutzten WLAN-Technologie gescheitert. Der Einsatz von Richtantennen ermöglichte die Steuerung der technischen Ausrüstung auch über größere Strecken hinweg.

## Testaufbau

Das Experiment wird mit dem gleichen Testaufbau durchgeführt, wie er in Kapitel 5.2.1 beschrieben ist. Die getesteten Entfernungen liegen in diesem Versuch allerdings bei 700 m und 1000 m Begegnungsabstand.

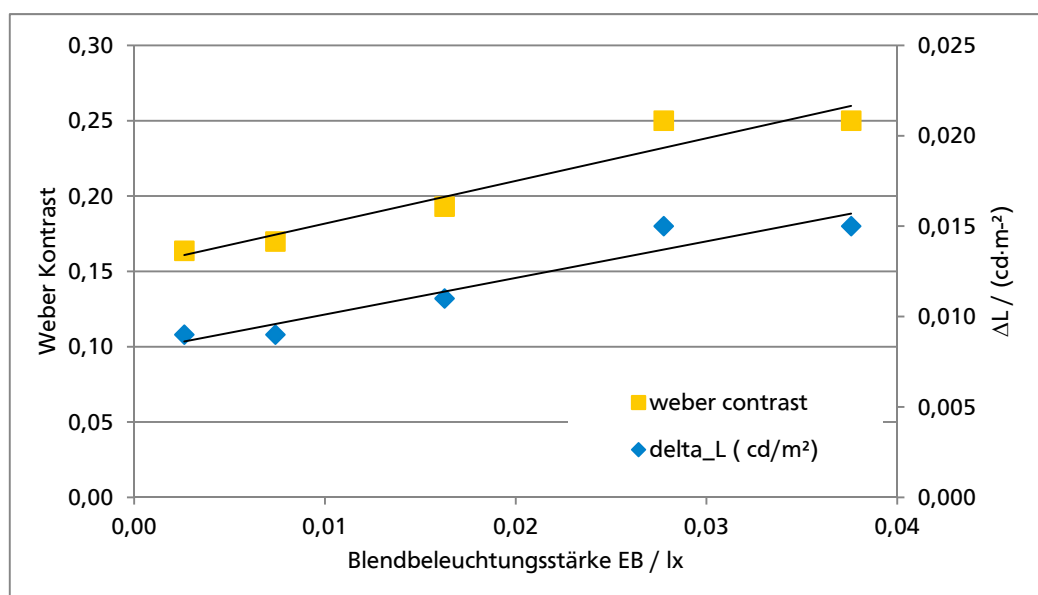
## Teilnehmer

Die Teilnehmer des Versuchs bestehen aus 11 männlichen und einer weiblichen Personen, alle im Alter zwischen 26 und 35 Jahren. Die fehlende Repräsentation älterer Menschen wird nicht als Nachteil gesehen, da der Alterseinfluss auf die Blendempfindlichkeit bereits eingehend untersucht wurde. Die Effekte des Alterns in Bezug auf die Blendung wurden ausführlich durch VOS analysiert [86, 89, 149]. READING widmete sich der Beschreibung der im Alter gesteigerten Readaptationszeit [150]. Eine Übersicht über die Mechanismen, die zur reduzierten Sehleistung im Alter führen liefert PARAMET [151].

Die Versuche wurden in der Zeit nach der astronomischen Dämmerungsphase und vor 23 Uhr durchgeführt, um den physiologischen Gegebenheiten des alltäglichen Verkehrs Rechnung zu tragen. Die körperliche Verfassung, wie Müdigkeit, Sauerstoffanteil der geatmeten Luft im Fahrzeug [152] etc. haben Einfluss auf Readaptationszeit und Blendempfindlichkeit. Alle Testpersonen waren nüchtern [153] und haben ihre gegebenenfalls vorgeschriebenen Sehhilfen getragen.

### 5.3.7 Ergebnisse der Langdistanzversuche

Zunächst ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Blendbeleuchtungsstärke  $E_B$  auf die Sehleistung der Probanden hat. Dafür wird, wie in den vorangegangenen Tests, die Schwellenleuchtdichtedifferenz  $\Delta L$  und der resultierende Weber-Kontrast zur Erkennung eines Landoltringes ermittelt. Für eine ausgewählte Testperson ist das Ergebnis für den Begegnungsabstand von 1000 m in Abbildung 49 dargestellt. Wie schon in den vorangegangenen Versuchen bestätigt sich der lineare Zusammenhang zwischen Blendbeleuchtungsstärke und benötigtem Kontrast der Sehaufgabe.



**Abbildung 49:** Korrelation zwischen physiologischer Blendung und Blendbeleuchtungsstärke. Der lineare Zusammenhang zwischen Blendbeleuchtungsstärke und physiologischer Beeinträchtigung erwartungsgemäß auch auf große Entfernung bestätigt. Dargestellt sind die Ergebnisse einer ausgewählten Testperson für 1000 m Begegnungsabstand

Motivation für die zusätzliche Durchführung der Langdistanzversuche war allerdings die Frage, ob sich der Einfluss des Blendwinkels  $\Theta$  mit der Erhöhung des Begegnungsabstandes  $d_B$  verringert. Dazu müssen die Ergebnisse jeder einzelnen Testperson für die zwei unterschiedlichen Entfernungen

verglichen werden. Die höhere Blendempfindlichkeit bei größerem Abstand äußert sich in einer höheren Steigung der Graphen nach Art der Abbildung 49.

Deren Steigung müsste also bei 1000 m Begegnungsabstand signifikant höher sein. Diese Steigung wird beschrieben durch einen persönlichen Faktor  $K$  für jede Testperson und einen Faktor  $P(d)$ , der vom Blendwinkel abhängt (vgl. Holladay). Dies führt zu dem modifizierten Modell

$$L_V = K \cdot P(d_B) \cdot E_B. \quad \text{Gl. 5-12}$$

Wenn man das Holladay-Modell akzeptierte, so würde der Faktor  $P$  quadratisch vom Blendwinkel abhängen. Es gilt nun herauszufinden, wie sich dieser Faktor tatsächlich über der Veränderung der Entfernung verhält. Der Blendwinkel  $\Theta$  ergibt sich aus Fahrbahnbreite  $l$  und Begegnungsabstand  $d_B$  durch den Zusammenhang

$$\theta = \arctan \left( \frac{l}{d_B} \right). \quad \text{Gl. 5-13}$$

Damit wird der Faktor  $P(d)$

$$P(d) = \arctan \left( \frac{l}{d_B} \right)^{-\beta}. \quad \text{Gl. 5-14}$$

Es gilt nun aus den experimentell ermittelten Werten den Exponenten  $\beta$  zu ermitteln. Dazu wird die Veränderung der Steigungen  $R$  der Graphen mit der Veränderung der Entfernung in Beziehung gesetzt. Das Gewicht, mit der sich diese Veränderung auf die Blendempfindlichkeit auswirkt, ist der Exponent  $\beta$ .

$$R = \frac{P(d_{B,2})}{P(d_{B,1})} = \left( \frac{\arctan\left(\frac{l}{d_{B,2}}\right)}{\arctan\left(\frac{l}{d_{B,1}}\right)} \right)^{-\beta} \approx \left( \frac{d_{B,1}}{d_{B,2}} \right)^{-\beta} \quad \text{Gl. 5-15}$$

Da der Wert  $R$  experimentell für die Entfernungen 700 m und 1000 m bestimmt werden kann, lässt sich der Exponent leicht errechnen.

$$R \approx \left( \frac{700m}{1000m} \right)^{-\beta} \quad \text{Gl. 5-16}$$

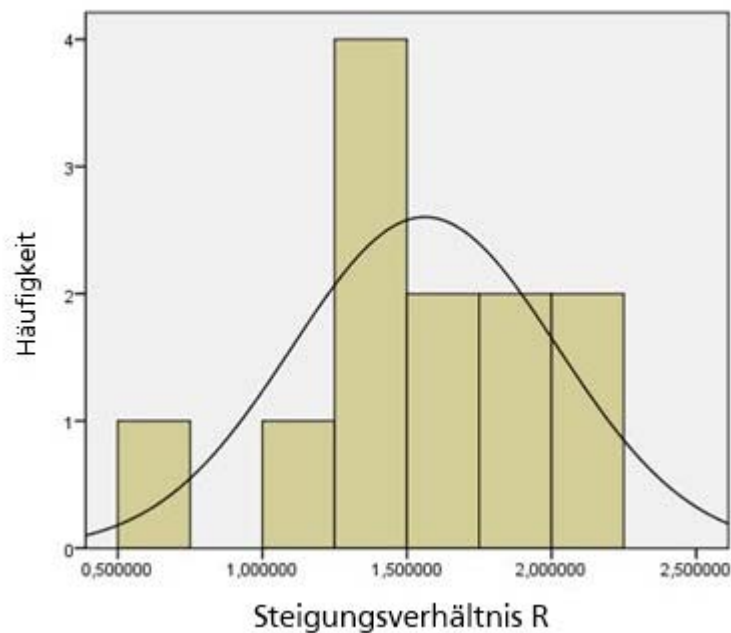
$$\beta = -\log_{0,7} R \quad \text{Gl. 5-17}$$

Daraus folgt für die Schleierleuchtdichte in Anlehnung an HOLLADAY:

$$L_v = K \cdot \theta^{-1,25} \cdot E_B \quad \text{Gl. 5-18}$$

Für die zwölf beteiligten Testpersonen ergeben sich abweichende Faktoren  $R$ . Das arithmetische Mittel liegt bei  $R=1,56$  bei einer Streuung von  $s=0,46$ . Die Verteilung illustriert Abbildung 50. Daraus folgt ein Exponent  $\beta=1,25$ . Für kurze Entfernungen wurde ein  $\beta=1,8$  ermittelt.

Dieses Ergebnis zeigt eindeutig, dass die gängigen Modelle nicht ohne weiteres Anwendung auf den Straßenverkehr finden können



**Abbildung 50: Auswertung der Steigungsfaktoren R**  
 Die Verteilung der Faktoren R für alle Testpersonen ist nicht normalverteilt. Eine Testperson weist einen Faktor  $R < 1$  auf, was bedeutete, dass sie bei kleineren Blendwinkeln weniger blendempfindlich wäre. Der Grund dafür konnte nicht identifiziert werden, wahrscheinlich sind aber Ermüdungserscheinungen.

### 5.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse Langdistanzversuche

Die Modelle der CIE und HOLLADAY sind nicht unmittelbar anwendbar, da sie verkennen, dass die Blendentfernung einen Einfluss auf die Blendwirkung hat und dass diese mit steigender Entfernung abnimmt.

CARRARO hingegen beschreibt einen unterproportionalen Zusammenhang der Blendung mit der Blendbeleuchtungsstärke, der innerhalb der untersuchten Umgebungsleuchtdichten und im Straßenverkehr auftretenden Blendbeleuchtungsstärken nicht nachvollzogen werden konnte. Ebenfalls ist die unterproportionale Abhängigkeit vom Blendwinkel in den Versuchsergebnissen nicht nachzuvollziehen.

Es bleibt also die Frage, warum die eigenen Ergebnisse von weitgehend unwidersprochenen Literaturangaben abweichen. HOLLADAY gibt in seiner Grundsatzschrift an, dass die Blendwirkung innerhalb seiner sieben Testpersonen unabhängig von der Lichtquellengröße und der Leuchtdichte (bei gleicher Lichtstärke) der Lichtquellen sei. Ähnliche Ergebnisse werden von PAUL veröffentlicht, der angibt, dass die Blendung von Lichtquellen unter  $0,005 \text{ m}^2$  projizierter Fläche bei konstantem Blendwinkel nur von deren Intensität  $I_B$  und Abstand  $d_B$ , ergo von  $E_B$ , abhängt [154]. Allen Untersuchungen ist allerdings gemein, dass sie unter Laborbedingungen stattfanden.

Da sich aus den statischen Versuchen starke Abweichungen zu den in der Literatur beschriebenen Labortests ergeben, sollte weiterhin untersucht werden, inwieweit die Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge tatsächlich relevant für die fehlerfreie Durchführung der Fahraufgabe ist. Diese Frage kann letztlich kein statischer Test klären. Es muss stattdessen ein Versuch während der Fahrt stattfinden.

## 6 Dynamische Blendungstests

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, hat die tatsächliche Situation eines Fahrers gegenüber einem Laborversuch signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse eines Blendungstests. Dieser Unterschied wird in der Literatur häufig als der „Praxisfaktor“ beschrieben.

Dieser Praxisfaktor eines unbewegten Versuchsaufbaus im Labor gegenüber der Realität sollte durch dessen Konzeption möglichst gering ausfallen. Für die vorhandene Problematik, die Beschreibung der Blendung eines Fahrzeugführers, kann dies jedoch bedeuten, dass statische Tests unzureichend sind.

Aus diesem Grund wird ein weiteres Experiment konzipiert, das den Effekt der physiologischen Blendung von Fahrern während der Fahrt messen soll. Da es hier primär um das Simulieren einer praxisnahen Sehaufgabe geht, die schnell gelöst werden soll, ist die Darstellung eines Landoltringes eher ungeeignet, wie sich in Vorversuchen zeigte. Die Komplexität der Sehaufgabe überfordert die meisten Versuchsteilnehmer. Auch ist die Vielzahl der Antwortmöglichkeiten für eine automatische Auswertung der Antwort hinderlich. Es ist daher eine neue Aufgabe für diese Art von Versuch zu entwerfen.

### 6.1 Entwurf einer Sehaufgabe für eine dynamische Blendungsbestimmung

Um eine Kontrastsehaufgabe zu entwerfen gilt es, zunächst ein Sehzeichen auszuwählen, das dem Probanden dargeboten wird. Hierbei ist es wichtig, die Sehaufgabe so auszulegen, dass es dem Testleiter ermöglicht wird, zu überprüfen, ob der Proband die Sehaufgabe richtig erkennt. Eine solche Überprüfbarkeit der Probandeneingabe verhindert, dass der Proband trotz „Nicht-Sehens“ eines Kontrastwertes angibt, diesen zu sehen. Somit wird eine potentielle Fehlerquelle ausgeschlossen.

Der Kontrast der Sehaufgabe wird verstellt, indem die Helligkeitsdifferenz des Sehzeichens gegenüber dem Hintergrund variiert wird. Im Folgenden wird eine Auswahl von Sehzeichen vorgestellt, die eine Kontrastsehaufgabe ermöglichen:

- Snellen-Buchstabe (vgl. Abbildung 51):  
Überprüfbarkeit durch Vorlesen des erkannten Buchstabens.
- Landoltring (vgl. Abbildung 31):  
Überprüfbarkeit durch Angabe der Lage der Öffnungsrichtung.
- Rechteck (vgl. Abbildung 53):  
Überprüfbarkeit durch Angabe der Lage des Rechteckes.

Die Gestaltung der Sehaufgabe mit einem Landoltring oder einem Snellen-Buchstaben wie in Abschnitt 5.1.5 kann nicht weiter verfolgt werden, da Vorversuche zeigten, dass die Lösung bei geringen Kontrastwerten zu unzuverlässig ist (zur Reliabilität verschiedener Sehzeichentests vgl. [155]). In dieser Arbeit wird die Kontrastsehaufgabe durch ein Rechteck gestaltet. Die Überprüfbarkeit der Sehaufgabe

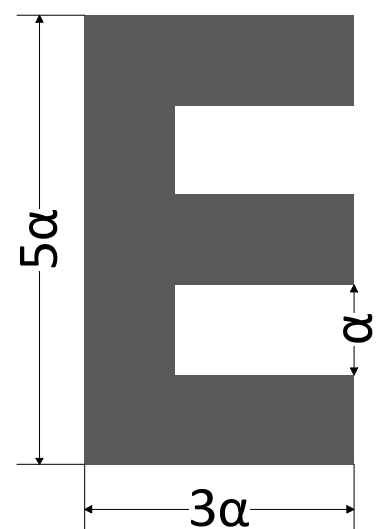


Abbildung 51: Snellen-Buchstabe



---

wird realisiert, indem sich die Lage des Rechteckes gegenüber einem Fixpunkt ändert (vgl. Abbildung 52) und der Proband die aktuelle Lage angeben muss.

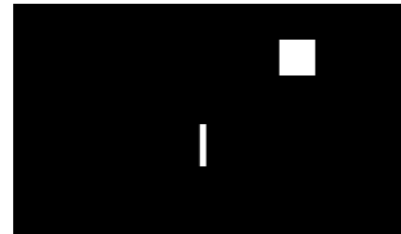
Um eine Überbelastung des Probanden zu vermeiden und die dynamische Fahrsituation so realistisch wie möglich zu halten, wird die Lage des Rechteckes nur in drei Positionen verändert. Hierbei wird die Lage durch einen stochastisch unabhängigen Auswahlprozess bestimmt.



Rechtecklage links



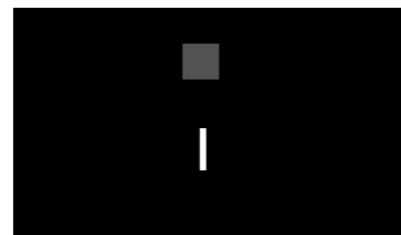
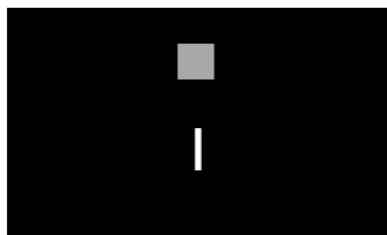
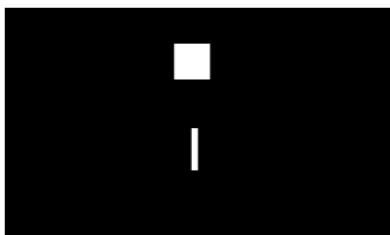
Rechtecklage Mitte



Rechtecklage rechts

**Abbildung 52:** Sehaufgabe mit Rechteck und Fixpunkt.

Der Kontrast zwischen Rechteck und Hintergrund wird variabel (vgl. Abbildung 53) gestaltet. Damit kann der Schwellenleuchtdichteunterschied  $\Delta L$  in Abhängigkeit vom Abstand des Probandenfahrzeugs von der Blendquelle ermittelt werden (vgl. Abschnitt 5.1.5). Die Erhöhung des Schwellenleuchtdichteunterschiedes bzw. des Schwellenkontrastes ist ein Maß für die Blendung.



**Abbildung 53:** Sehaufgabe mit variablem Kontrast.

Da eine Abhängigkeit des Schwellenkontrastes von der Rechteckgröße vorherzusehen ist, ist eine einstellbare Rechteckgröße bei der Realisierung der Sehaufgabe vorgesehen.

## 6.2 Versuchsaufbau

Für die Realisierung der oben beschriebenen Sehaufgabe werden verschiedene Komponenten benötigt. Zuerst ist hierbei die Anzeige zu nennen, welche die Sehaufgabe darstellt. Weiter wird ein Fahrzeug benötigt, in welchem sich der Proband dynamisch, also fahrend, auf das blendende Fahrzeug zubewegt. Die Verarbeitung der Probandeneingaben und die Darstellung der Sehaufgabe erfordern einen in das Probandenfahrzeug integrierten Rechner mit angeschlossenen Mikrofon und Lautsprecher. Der Lautsprecher wird verwendet, um dem Probanden kenntlich zu machen, dass eine Eingabe von ihm erwartet wird. Zur Messung der Blendbeleuchtungsstärke sowie der Fahrzeugabstände wird zusätzliche Sensorik (Luxmeter) im Probandenfahrzeug benötigt. Der grundlegende Aufbau der Hardware ist Abbildung 54 zu entnehmen.

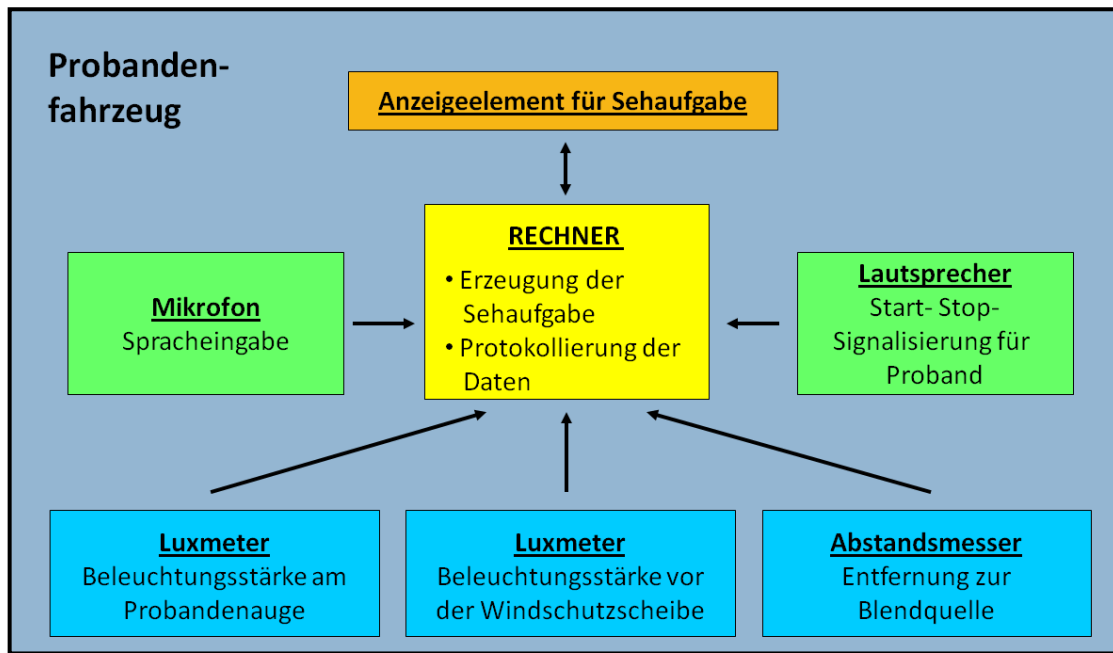


Abbildung 54: Blockschaltbild Freiversuchstand

Der Freiversuchsstand ist vollständig in das Probandenfahrzeug integriert. Im weiteren Verlauf wird genauer auf die einzelnen Hardware-Komponenten eingegangen.

### 6.2.1 Darstellung der Sehaufgabe über ein Head-Up-Display

Für die Versuche wird ein BMW 530i (E61) verwendet. Das in diesem Fahrzeug verbaute Head-Up-Display (HUD) wird jedoch aufgrund seiner hohen Winkelabhängigkeit der Leuchtdichte entgegen der ursprünglichen Planung nicht verwendet.

Stattdessen erzeugt ein mobiles VGA-Display eine Sehaufgabe. Diese Aufgabe wird ebenfalls über die Windschutzscheibe eingespiegelt. Nachteilig an der Verwendung dieses Displays ist, dass der optische Weg der Darstellung kürzer ist und der virtuelle Abbildungsort der Sehaufgabe somit nicht wie beim Original-HUD etwa 2,5 m vor dem Fahrerauge liegt, sondern nur etwa 1 m. Damit ist der Einfluss der Akkommodation höher. Da dieser Einfluss jedoch bei jedem Blendungszustand gleich groß sein dürfte, ist keine merkliche Auswirkung auf das Versuchsergebnis zu erwarten.

Der Vorteil eines derart realisierten HUD ist der geringe Winkel zwischen dem Fixpunkt des Sehens beim Autofahren und Betrachten der Sehaufgabe. Das HUD garantiert hierdurch, dass der Proband seine Sehachse zur Betrachtung der Sehaufgabe gegenüber der normalen Fahrsituation nur geringfügig ändern muss. Somit wird eine durch ein Fernlichtassistenzsystem verursachte Blendsituation realitätsnah beurteilt.

#### Ansteuerung des Head-Up-Displays

Die Ansteuerung des TFT-Displays ist über die herkömmliche VGA-Schnittstelle als zusätzlicher Monitor am Protokollrechner realisiert. Da die Sehaufgabe farblich neutral gestaltet werden soll, ergeben sich 255 Helligkeitsstufen (Grauwerte, auch engl.: *code value (CV)* oder *grey value*).

Da die Hintergrundhelligkeit des TFT-Displays (Schwarzwert, *code value* = 0) relativ hoch ist, wird vor die Mattscheibe ein zusätzliches Neutralglas gesetzt.

## Vergleichsmessungen zur Kontrastbestimmung

Die Messung der Kontrastschwelle während des Versuchs erfolgt über die erkannten Leuchtdichtekontraste der Sehaufgabe. Um von der Hintergrundhelligkeit und der Rechteckhelligkeit auf den aktuellen Kontrast der Sehaufgabe zu schließen, wird das HUD mit einer Leuchtdichtekamera vermessen. Hierbei wird die Kamera so im Fahrzeug angeordnet, dass ihre Objektivachse der Sehachse beim Betrachten der Sehaufgabe entspricht.



Abbildung 55: HUD Vermessung.

Um eine Vergleichbarkeit der Kontrastwerte zu garantieren, wird der Bereich, auf dem das Bild in der Windschutzscheibe erscheint, von außen mit schwarzem Band abgeklebt. Ohne das Abkleben würde sich die Hintergrundhelligkeit der Sehaufgabe, bei konstanter Helligkeit des HUDs, durch variierende Fahrbahnelligkeiten und Streulichtentstehung an der Windschutzscheibe unterscheiden.

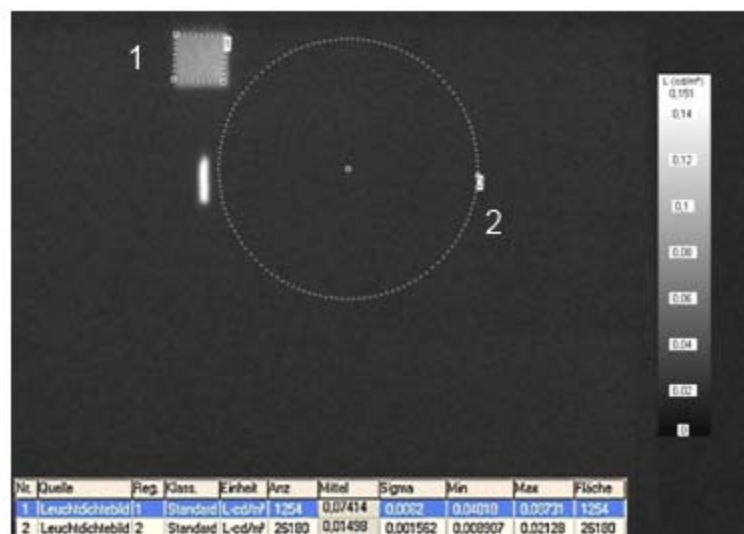


Abbildung 56: Auswertung der Leuchtdichtemessung für den Codevalue 240.

Zur Verstellung des Kontrastes wird die Helligkeit des Rechteckes über den Grauwert variiert. Während der Vortests hat sich eine Variation des Grauwertes im Bereich von 75 bis 255 als sinnvoll

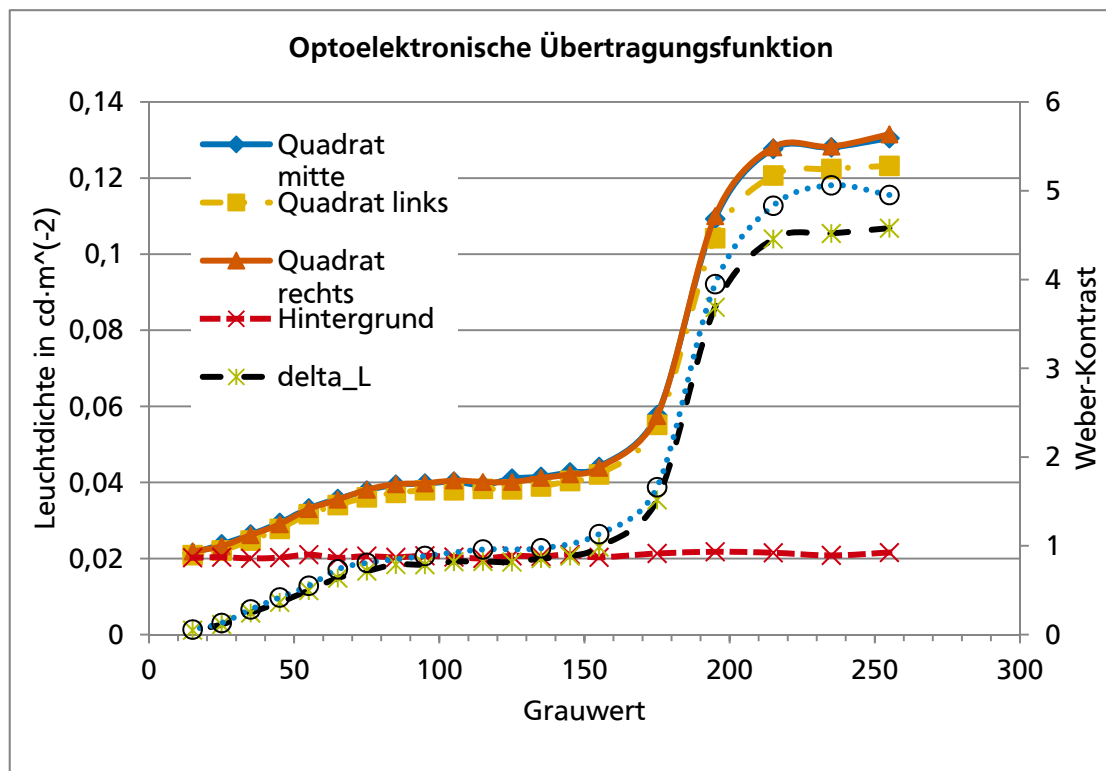
herausgestellt. Diese Bandbreite garantiert eine ausreichende Kontrastverstellbarkeit zur Bewertung der Blendung über die Erhöhung der Schwellenleuchtdichte.

Für die oben beschriebenen Bedingungen wird eine Vermessung des Displays mit einer Leuchtdichtekamera durchgeführt. Hierbei wird je ein Bild für einen Codevalue aufgenommen und später am Computer hinsichtlich des Leuchtdichteunterschiedes ausgewertet. Die Auswertung am Computer wird mit Hilfe der Software LMK 2000 der Firma Techno Team Bildverarbeitung GmbH durchgeführt.

Die Auswertung soll an dem in Abbildung 56 dargestellten Beispiel erläutert werden. Bereich 1 markiert das Rechteck, Bereich 2 die Umfeldleuchtdichte. Die mittlere Leuchtdichte für das Rechteck mit dem Codevalue 240 beträgt  $L_R = 0,07414 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Für den Hintergrund beträgt die mittlere Leuchtdichte  $L_H = 0,01498 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Der Kontrast der Sehaufgabe berechnet sich somit zu

$$\Delta L = L_R - L_H = 0,07414 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} - 0,01498 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} = 0,05916 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{Gl. 6-1}$$

Werden entsprechende Messungen für den Grauwertbereich 15..255 durchgeführt, so ergibt sich der in Abbildung 57 dargestellte Verlauf der optoelektronischen Übertragungsfunktion.



**Abbildung 57:** Messungen der Leuchtdichtedifferenz der Sehaufgabe Darstellung in Abhängigkeit vom Grauwert des HUD und des Darstellungsortes des Rechteckes (links, mitte oder rechts). Der Weberkontrast ist für den Mittelwert aller Quadratepositionen errechnet.

Mit der Einstellung eines bestimmten Grauwertes lässt sich also ein konkreter Leuchtdichteunterschied  $\Delta L$  der Sehaufgabe vorgeben. Dieser bzw. der daraus errechnete Weberkontrast (s. Gl. 5-3) kann später als physiologisches Maß zur Beurteilung des Blendungseinflusses genutzt werden.

## 6.2.2 Messen der Entfernung zur Blendquelle

Zur Charakterisierung der Blendeigenschaften eines Fernlichtassistenzsystems ist es notwendig, den Abstand  $x$  des Probandenauges zur Blendquelle zu kennen. Dies erlaubt unter anderem die Charak-

---

terisierung über die Verknüpfung des Schwellenkontrastes  $K_{SK}(x)$  mit dem gemessenen Abstand  $x$ . Weiter wird der Abstand zur Berechnung des Blendwinkels  $\Theta$  (vgl. 6.2.4) benötigt.

Die verfügbaren Mittel zur Abstandsmessung sind ein GPS-Empfänger Modell AEK-4T der Firma u-blox und ein Correvit-Sensor Modell S-350 der Firma Corrsys Datron Sensorsysteme GmbH. Eine optische Abstandsmessung kann nicht verwendet werden, da der Freiversuchsstand auch bei Fahren über Kuppen oder um Kurven funktionieren muss und somit keine garantierte Sichtverbindung zwischen den Fahrzeugen herrscht. Im Übrigen ist eine optische Abstandsmessung in komplexen Umgebungen ein schwierig zu implementierendes und fehleranfälliges Werkzeug.

Für die Verwendung des GPS-Empfängers sprechen die einfache Installation am Probandenfahrzeug sowie die unkomplizierte Integration in die Softwareumgebung (vgl. 6.3). Der Correvit-Sensor hat den Vorteil einer sehr geringen Messabweichung von  $\pm 0,1\%$  [156], erfordert aber eine zeitaufwendige Installation und Kalibrierung am Probandenfahrzeug und ist wesentlich teurer als der GPS-Empfänger. Zudem ist das System gegenüber Schmutz und Regen anfälliger. Da der Versuchsaufbau zudem auch im öffentlichen Straßenverkehr verwendbar sein sollte und der Correvit-Sensor prinzipbedingt über die Fahrzeugkonturen hinausragt, fällt die Entscheidung zugunsten des GPS-Systems.

Beide Verfahren benötigen die Kenntnis über die Länge der zu fahrenden Strecke, da sie nur die Länge der in Richtung der Blendquelle zurückgelegten Strecke bestimmen. Über einfache Differenzrechnung muss der Abstand berechnet werden. Die Exaktheit beider Verfahren ist somit grundlegend von der Genauigkeit einer einmaligen Ausmessung der Abstände abhängig.

Im Vorversuch wird die Strecke zwischen Startpunkt des Probandenfahrzeugs und Standort des Blendfahrzeuges (813 m) in einer Messserie mit  $N=30$  Versuchen unter Verwendung des GPS-Systems vermessen. Es ergibt sich ein gemessener Mittelwert von 811,7 m bei einer Streuung von 4,8 m. Dabei zeigt sich eine maximale Abweichung von 11,7 m, was einer Ungenauigkeit von 1,4 % entspricht. Die mittlere Abweichung betrug dabei 3,8 m (0,47 %).

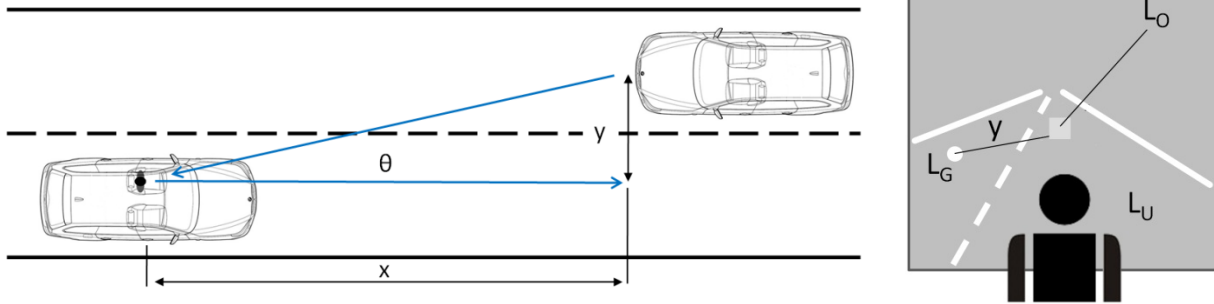
### 6.2.3 Messen der Blendbeleuchtungsstärke

Der Freiversuchsstand erlaubt die Messung der Blendbeleuchtungsstärke am Fahrerauge selbst und der Beleuchtungsstärke am Fahrerauge vor der Windschutzscheibe. Die Beleuchtungsstärke am Fahrzeug vor der Windschutzscheibe (auf Augenhöhe des Fahres) wird gemessen, um die Blendbeleuchtungsstärke ohne Einfluss von Absorption und Reflexion durch die Windschutzscheibe zu ermitteln.

Für die Bestimmung der Beleuchtungsstärken werden Photometer vom Typ HCT-99 der Firma Gigahertz-Optik eingesetzt, welche über eine USB-Schnittstelle ausgewertet werden können. Zur Befestigung der Messköpfe in der Nähe des Fahrerauges werden Saugnapfhalterungen verwendet, die eine Befestigung innen und außen an der Windschutzscheibe erlauben.

### 6.2.4 Bestimmung des Blendwinkels

Der Blendwinkel  $\Theta$  wird zur Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte benötigt. Hierbei beschreibt der Blendwinkel den Winkel zwischen Blendquelle und Sehachse. Für die Berechnung des Blendwinkels wird die Entfernung zwischen Fahrerauge und Blendfahrzeug  $x$  und der seitliche und der Höhen-Versatz  $y$  des Probanden zur Blendquelle verwendet.



**Abbildung 58: Bestimmung des Blendwinkels  $\Theta$ .**

Der Wert für den seitlichen Versatz  $y$  muss vor den Messfahrten ermittelt werden. Er ergibt sich aus den Fahrzeuggeometrien, der Breite der Messstrecke und dem Höhenunterschied zwischen Blendquelle und Sichtziel. Der Abstand  $x$  ergibt sich wie in 6.2.2 beschrieben. Aus diesen Daten lässt sich der Blendwinkel folgendermaßen berechnen:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad \text{Gl. 6-2}$$

## 6.2.5 Protokollierung und Integration in das Probandenfahrzeug

Um eine dynamische Blendungsmessung durchzuführen, musste das Probandenfahrzeug umgebaut werden (vgl. Abbildung 59). Zur Protokollierung der Daten und zur Ansteuerung des HUDs wurde ein Rechner in den Kofferraum eingebaut. Um eine Anbindung des HUDs an den Rechner herzustellen, wurden Daten- und Videokabel im Innenraum verlegt.

Für die Kontrolle der Messfahrten wurde hinter dem Beifahrersitz ein Arbeitsplatz für den Testleiter eingerichtet. Dieser umfasst einen Touchscreen, eine USB-Hub zum Datenabgleich und eine Tastatur-Touchpad-Kombination.

Die Spracheingabe und die Ausgabe des Tonsignals werden durch die Verwendung eines Head-Sets realisiert. Die Energieversorgung der verbauten Komponenten wurde durch die Installation eines DC-AC Wandlers, der eine 220 Volt Spannungsversorgung herstellt, gewährleistet.

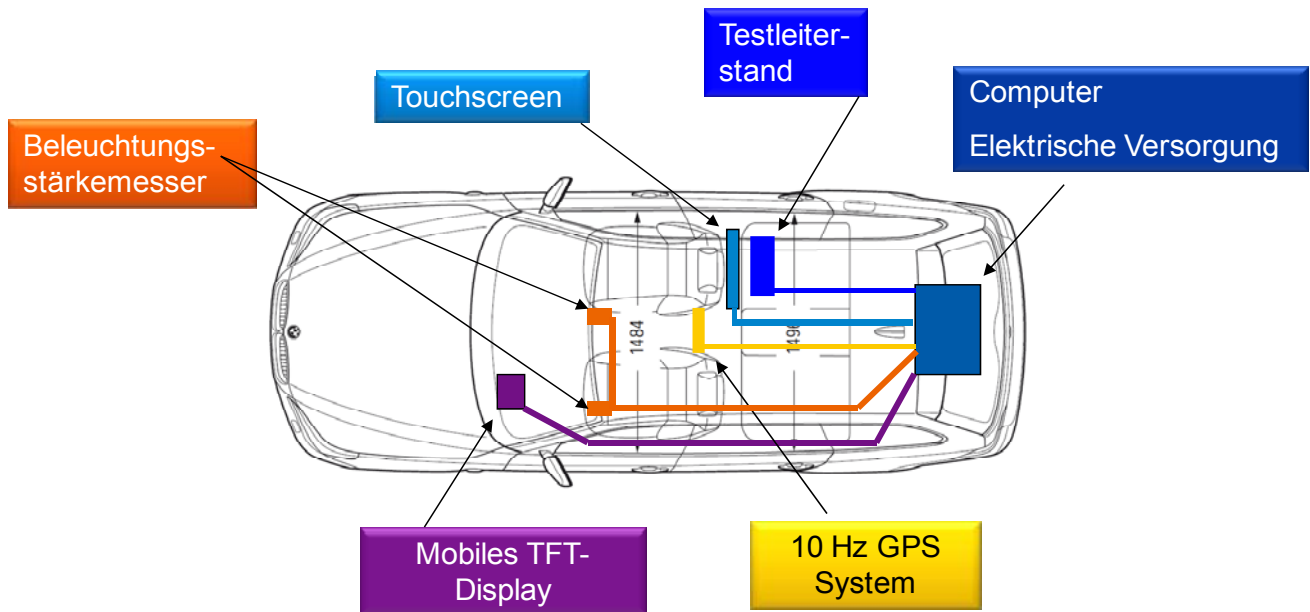


Abbildung 59: Hardwareintegration in das Probandenfahrzeug.

## 6.3 Software

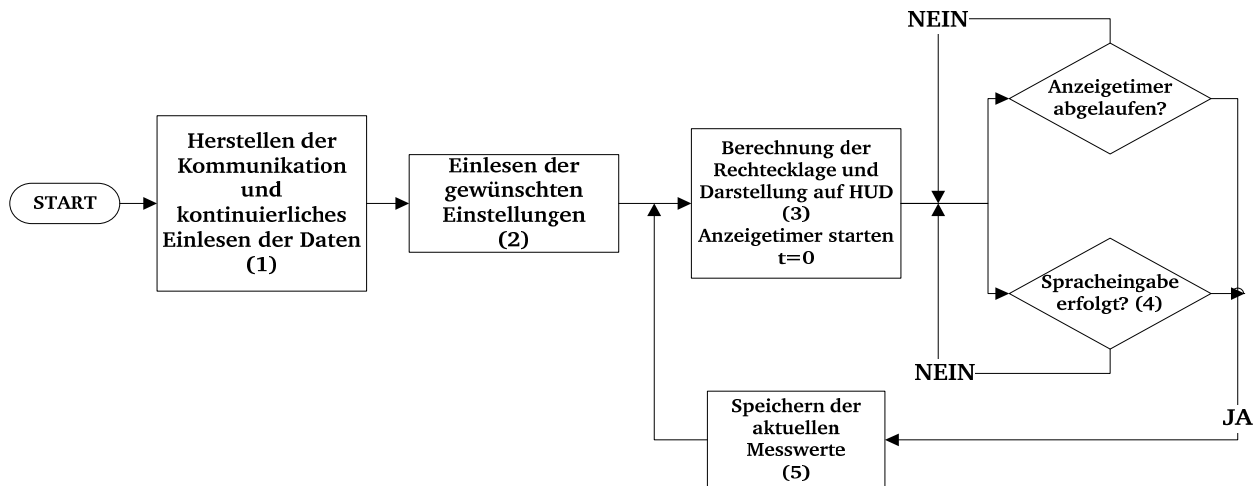
Zur Realisierung des Freiversuchstandes wird eine Steuersoftware benötigt. In diesem Kapitel werden die an die Software gestellten Anforderungen, die Realisierung und die fertige Version selbst dargestellt.

Zur Umsetzung wird die Programmiersprache C# verwendet, da sie einen ereignisbasierten Programmablauf ermöglicht und in Kombination mit Microsoft Windows Vista eine Klassenstruktur zur Sprachverarbeitung anbietet.

### 6.3.1 Anforderungen an die Software und deren Umsetzung

Für den Betrieb des Freiversuchstandes werden ein Programm zur Bestimmung der psychologischen Blendung und ein Meßprogramm zur Bestimmung der physiologischen Blendung benötigt. Die schematische Umsetzung wird nun im folgenden Flussdiagramm dargestellt. Nach der Initialisierung der Software (Schritt 1 und 2) wird eine Schleife durchlaufen, in der zunächst die Lage des Rechteckes über einen Zufallsgenerator ermittelt wird. Mit der Anzeige des Rechteckes beginnt die Messung der Reaktionszeit (Schritt 3). Die Anzeige wird abgebrochen, wenn entweder eine Spracheingabe erfolgt ist oder der Timer für die Maximalanzeigedauer abgelaufen ist (Schritt 4). Die ermittelten Parameter werden gespeichert (Schritt 5) und eine neue Sehaufgabe angezeigt.





**Abbildung 60:** Flussdiagramm Programm physiologische Blendung.

Die Protokolldaten enthalten die Antwort des Probanden, die tatsächliche Anzeigeparameter, sowie die gefahrene Strecke und die Reaktionszeit, die der Proband benötigt, um die Lage des Rechteckes zu erkennen. Hierfür wird die Differenz der Zeit zwischen der Anzeige des Rechteckes und der Spracheingabe gebildet.

Zur Messung der psychologischen Blendung (discomfort glare) wird der beschriebene Ablauf insofern modifiziert, dass keine Sehaufgabe angezeigt wird, sondern der Proband in regelmäßigen zeitlichen Abständen aufgefordert wird, seine gefühlte Blendung über die inverse DeBoer-Skala zu bewerten (s. Tabelle 18, Seite 90).

Der Testleiter, der die Probandenversuche durchführt, sitzt im Probandenfahrzeug hinter dem Beifahrersitz. Ihm wird durch die grafische Benutzeroberfläche ermöglicht, Einstellungen zu verändern und Programmabläufe zu steuern.

## 6.4 Versuchsdurchführung und -auswertung

Dieses Kapitel erläutert die Vorgehensweise bei der Durchführung der dynamischen Versuche und die Methodik bei der Auswertung der Ergebnisse. Die Versuche wurden ausschließlich bei trockener Witterung auf dem Testgelände des Fachgebiets Lichttechnik auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim durchgeführt. Als Blendquelle werden Xenon-Scheinwerfer eines Audi A6 verwendet. Die Einstellung dieser Scheinwerfer wird vor jedem Testdurchlauf überprüft und gegebenenfalls neu justiert.

An den Versuchen zur Verifikation des Freiversuchstandes hinsichtlich der physiologischen Blendung nahmen 18 Probanden teil. Hierbei trug jeder Proband, falls notwendig, seine Sehhilfe.

### 6.4.1 Aufbau und Durchführung

Zur allgemeinen Durchführung werden die Probanden angewiesen, mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf das blendende Fahrzeug zuzufahren. Hierbei wird in einem Abstand von 813 Metern beschleunigt und hinter dem Blendfahrzeug in einem Abstand von 200 Metern wieder gestoppt. Weiterhin haben die Probanden die Aufgabe, während der Fahrt nach Erklingen eines Tones die Lage des im HUD dargestellten Rechteckes bezüglich eines Fixpunktes, anzugeben. Die Größe des

Rechteckes wird hierbei auf  $\alpha \approx 15'$  eingestellt. Die Anzeigedauer des Rechteckes kann variabel eingestellt werden. In Vorversuchen hat sich eine Anzeigedauer von 2,5 s als optimal herausgestellt. Nach dem Ablauf dieser Zeit wird durch die Software eine neue, zufällige Rechtecklage berechnet und das Rechteck gleichzeitig mit dem Erklngen des Tones an dieser Stelle angezeigt. Ausgehend von etwa 1000 m Fahrstrecke und 0,5..1 s Pause zwischen den Darstellungen ergeben sich so etwa 15 Präsentationen pro Fahrt. Die Probanden werden angewiesen die Lage des Rechteckes nicht zu erraten, sondern nur bei sicherem Erkennen eine Lage anzugeben und nur bei Erklngen des Tones auf die Sehaufgabe zu schauen. Es wird darauf geachtet, dass jeder Proband den gleichen Schwinkel zur Sehaufgabe hat, indem die Augenhöhe und Sitzposition der Fahrer möglichst konstant gehalten wird.

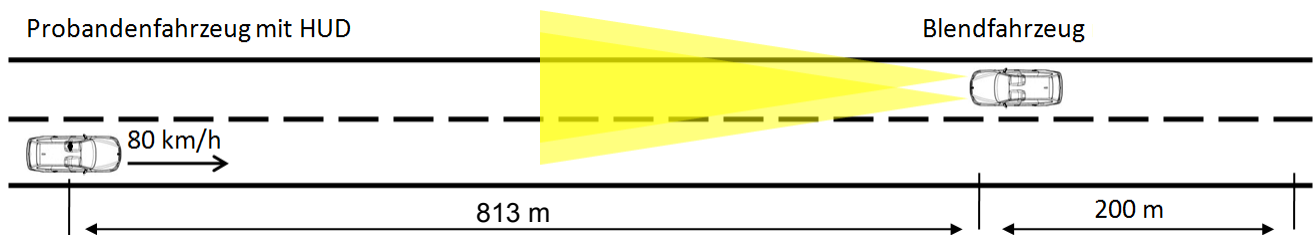


Abbildung 61: Schematischer Aufbau der Versuchsstrecke.

Die Messungen werden sowohl unter Blendung durch Fernlicht als auch unter Blendung durch Abblendlicht durchgeführt. Das blendende Fahrzeug steht hierbei still.

Bei Fernlichtblendung und Abblendlichtblendung werden mit jedem Probanden jeweils zehn Fahrten mit unterschiedlichen Kontraststufen durchgeführt.

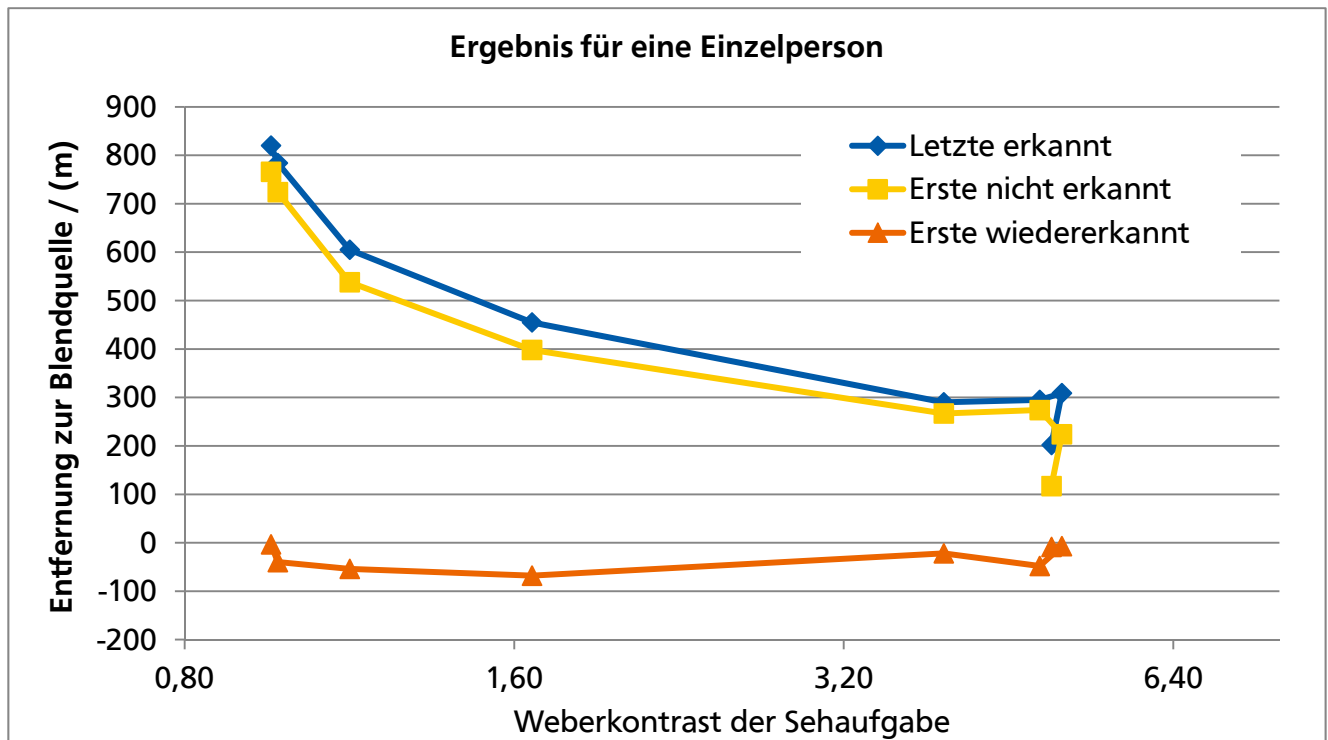
## 6.4.2 Auswertung der Ergebnisse

Im Folgenden wird die Auswertung der Probandentests beschrieben. Die Tests zu Fernlicht und Abblendlicht werden dabei getrennt behandelt.

Die Ergebnisse werden vom Protokollrechner dokumentiert. Diese Rohdaten werden dann zunächst von offensichtlichen Fehlern bereinigt und danach ausgewertet. Zu den offensichtlichen Fehlern gehören beispielsweise fehlerhafte Erkennungen der Spracheingabe oder Verwechslungen von „links“ und „rechts“ der Testpersonen, die dem Testleiter bereits während des Tests aufgefallen sind.

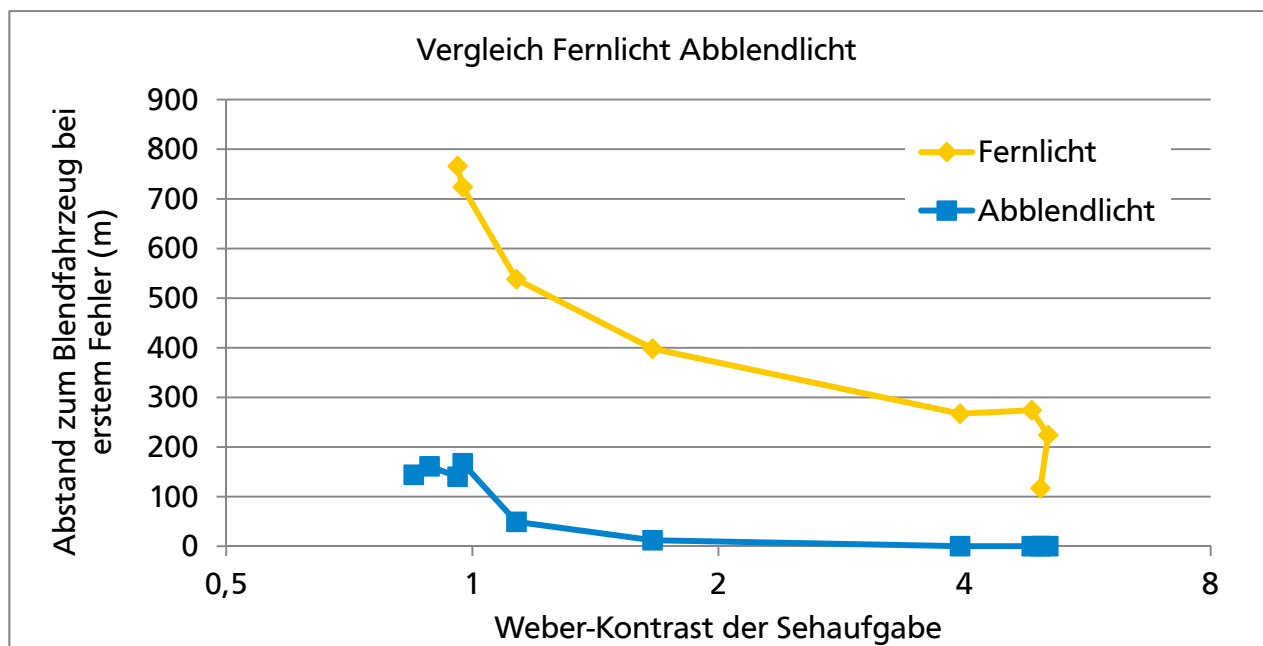
Es empfehlen sich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Zunächst können die Testpersonen individuell ausgewertet werden, was bedeutet, dass diejenige Entfernung ermittelt wird, ab der unter dem angebotenen Kontrast keine Erkennung des Sehzeichens mehr möglich ist. Diese Entfernungen können dann über die Gesamtheit aller Testteilnehmer statistisch ausgewertet werden. Als Resultat lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Entfernung zur Blendquelle und des Auftretens eines ersten Fehlers beschreiben. Für eine einzelne Testperson ergibt sich dabei die Charakteristik in Abbildung 62.

Die Abbildung 62 zeigt die Abhängigkeit der Entfernung, bei dem ein Fehler auftritt, vom dargebotenen Grauwert (resp. Kontrast) der Sehaufgabe. Für die dargestellte Testperson gilt also, dass ein kleiner Kontrast dazu führt, dass der erste Fehler („Erster nicht erkannt“) schon bei großen Abständen zum Blendfahrzeug auftritt. Dieser Abstand verringert sich wie zu erwarten mit steigendem Kontrast der Sehaufgabe. Wenn das blendende Fahrzeug passiert wurde (negative Werte auf der Ordinate), kann die Sehaufgabe wieder gelöst werden. Bemerkenswerterweise gibt es keinen mit dieser Methode messbaren Adaptationseffekt. Die Sehaufgabe wird unabhängig vom dargebotenen Kontrast bereits unmittelbar nach Passieren des Gegenverkehrs wieder korrekt gelöst.



**Abbildung 62:** Blendeinfluss in Abhängigkeit vom dargebotenen Grauwert der Sehaufgabe  
Entfernung, bei der die Aufgabe zuletzt korrekt gelöst wurde und jene Entfernung, bei der der erste Fehler gemessen wurde, in Abhängigkeit von der Helligkeit der Sehaufgabe bei Fernlichtblendung. Nachdem die Blendquelle passiert wurde, wird die Aufgabe umgehend wieder korrekt gelöst

Unter Nutzung dieser Auswertemethode kann auch die Sehleistung desselben Probanden unter Blendung durch Abblendlicht dargestellt werden. Im Folgenden wird lediglich die Entfernung untersucht, bei der die erste Fehlerkennung für jede Fahrt verzeichnet wurde.



**Abbildung 63:** Vergleich der Sehleistung bei Abblendlicht und Fernlicht für eine Testperson

Abbildung 63 zeigt den direkten Vergleich der Sehleistung einer einzelnen Testperson unter Blendungseinfluss durch Fernlicht und Abblendlicht. Da die Blendwirkung eines Abblendlichtes prinzipiell akzeptiert werden muss, könnte die Sehleistung eines Probanden unter Abblendlicht mit der unter

Fernlichteinfluss direkt verglichen werden. Der Blendeinfluss des Abblendlichtes bei einer festzulegenden Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen könnte also als Höchstmaß für eine tolerierbare Fernlichtblendung dienen. Wird diese erreicht, sollte die Blendung durch geeignete Maßnahmen begrenzt werden. Dies könnte durch Abblenden bei Fernlichtassistenzsystem oder durch gezieltes Entblenden des Gegenverkehrs bei adaptiven Fernlichtsystemen geschehen. Diese Vorgehensweise wird in der abschließenden Bewertung als Maßstab herangezogen. Das Resultat ist damit eine Grenzentfernung für jede einzelne Testperson, bei der die Fernlichtblendung gerade die Beeinträchtigung durch Abblendlicht erreicht. Die in dieser Studie gewählte Referenzentfernung für diese Beeinträchtigung sind 50 m, in Anlehnung an den Punkt B50L aus dem ECE-Testschirm, der häufig als Teil der Bewertung der Blendeigenschaften von Scheinwerfern dient.

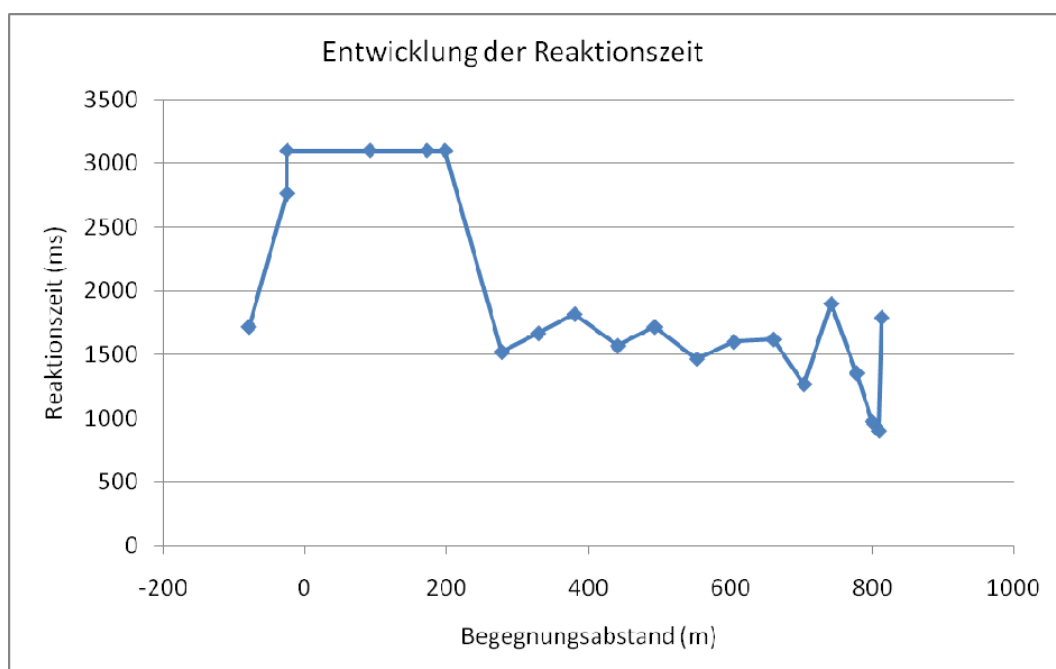
Im Anschluss können die gefundenen Einzelergebnisse benutzt werden, um eine mittlere Beeinträchtigung und deren Streuung über die Gesamtheit aller Testpersonen zu errechnen.

Eine andere Vorgehensweise kann darin bestehen, die Ergebnisse aller Testteilnehmer als Ganzes auszuwerten. Hier wird die Gesamtheit aller Fehler über einer Kontraststufe und der Entfernung zum Blendobjekt aufgetragen. Es kann somit für die absolute Fehlerzahl ein Schwellwert definiert werden, der einer gerade noch tolerierbaren Blendbelastung äquivalent ist.

Einen indirekten Hinweis über die zunehmende Blendung bei Annäherung an eine Blendquelle könnte die Entwicklung der Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Blendbeleuchtungsstärke geben.

### 6.4.3 Auswertung der Dauer zwischen Rechteckdarstellung und Probandeneingabe

Eine Charakterisierung der Blendung lässt sich über das Messen der Zeit zwischen Anzeige des Rechteckes bzw. Erklingen des Signaltones und dem Geben der Antwort durch den Probanden herstellen.



**Abbildung 64:** Entwicklung der Reaktionszeit (Beispiel) bis zum Beginn des Gebens der Antwort für eine Fahrt mit konstantem Kontrast und unter Blendung durch Fernlicht.

Abbildung 64 zeigt exemplarisch einen Verlauf der Zeit, die vergeht, bis das Antworten beginnt, das heißt, bis die Spracherkennung den Beginn einer Antwort erkennt. Zeiten von 3100 ms bedeuten dabei, dass es keine Antwort innerhalb der zulässigen Zeit gab. Betrachtet man den Verlauf über den Fahrtweg (also abnehmenden Begegnungsabstand), so ist in diesem konkreten Fall ein leichter Anstieg der Reaktionszeit zu erahnen. Es stellt sich hier die Frage, ob dieser Verlauf charakteristisch ist, oder ob die Reaktionszeit zunächst stabil bleibt, bis der Punkt erreicht ist, an dem die Sehaufgabe gar nicht mehr gelöst werden kann. Eine solche Charakteristik spräche dafür, dass das Auflösungsvermögen des Versuchsaufbaues sehr gering ist. Er wäre demnach nur unzureichend geeignet, eine differenzierte Aussage über die Blendbelastung der einzelnen Probanden zu liefern.

Umgekehrt wäre ein charakteristisches, kontinuierliches Ansteigen der Reaktionszeit bis zum Punkt des Nichterkennens ein Hinweis darauf, dass die Methodik ausreichend sensitiv ist und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Eine Analyse der Entwicklung der Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Blendungseinfluss findet sich in Abschnitt 6.5.

#### 6.4.4 Dynamische Versuche zur Bestimmung der psychologischen Blendung

Zur Bestimmung der psychologischen Blendung werden die Probanden aufgefordert, auf das Blendfahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h zuzufahren. Die geometrischen Bedingungen entsprechen denen bei der Bestimmung der physiologischen Blendung.

Die psychologische Blendung ist nicht über die Einschränkung einer bestimmten physiologischen Fähigkeit quantifizierbar. Da sie einen individuellen psychologischen Effekt umschreibt, der in dem Geblendeten stattfindet erfordert diese Blendungsart eine subjektive Bewertung durch den Probanden. Die hierfür in der Literatur beschriebene Bewertungsskala ist die de Boer-Skala (vgl. Abschnitt 5.1.5, [157] und [88]).

Diese Bewertungsskala wird für die dynamischen Versuche in einer invertierten Form verwendet. Hierbei wird die Skala in ihrer Polarität umgekehrt (s. Tabelle 18). Somit soll ein Proband eine unerträgliche Blendung mit „9“ bewerten.

Der Grund hierfür liegt darin, dass eine höhere Blendung sich sinnvoller mit einem ebenso erhöhten Skalenwert bewerten lässt, die Skala ist somit für die Testteilnehmer intuitiver. Während der Vorversuche kam es immer wieder vor, dass die Probanden bei schnellen Entscheidungen die Skala versehentlich invertierten. Die zur Probandeneingabe bei der physiologischen Blendung herangezogene Spracherkennung wird auch hier verwendet.

Von einer Verwendung einer stufenlosen Skala z.B. unter Verwendung eines Schiebereglers wie in Abschnitt 5.1.5 und [158] beschrieben wird abgesehen. Die zur Bedienung aufzuwendende Zeit und die damit verbundene Blickabwendung sind während der Erfüllung einer Fahraufgabe nicht tolerierbar.

Während der Fahrt hat der Proband die Aufgabe, sich entsprechend der invertierten de Boer-Skala über die empfundene Blendung zu äußern. Hierbei gibt der Proband alle 2,5 Sekunden eine mündliche Bewertung ab. Die Aufforderung hierzu erfolgt durch einen Ton. Gibt der Proband eine Bewertung ab, werden die aktuellen Blendbeleuchtungsstärken und der Abstand zwischen Probandenauge und Blendquelle automatisch protokolliert.

Tabelle 18: invertierte de Boer – Skala

9 -	Unerträglich
8 -	
7 -	Störend
6 -	
5 -	gerade zulässig
4 -	
3 -	Akzeptabel
2 -	
1 -	Gerade merklich

Ein typisches Ergebnis für drei Fahrten stellt Abbildung 65 anschaulich dar. Zu sehen ist hierbei, dass bei Verringerung des Abstandes zur Blendquelle eine Erhöhung der empfundenen Blendung auftritt. Dies geschieht unabhängig davon, ob die Probanden durch Fernlicht oder Abblendlicht geblendet sind. Die Blendung durch Abblendlicht wird in diesem Fällen jedoch nie mit einer höheren Bewertung als 5 („gerade zulässig“) bewertet.

Die Verifikationsfahrten zeigen einen korrelierenden Verlauf der psychologischen und physiologischen Blendung. Beide Blendungsformen nehmen zur Blendquelle hin zu und danach schlagartig wieder ab. Dennoch zeigen sich Unterschiede, auf die im Weiteren eingegangen wird.

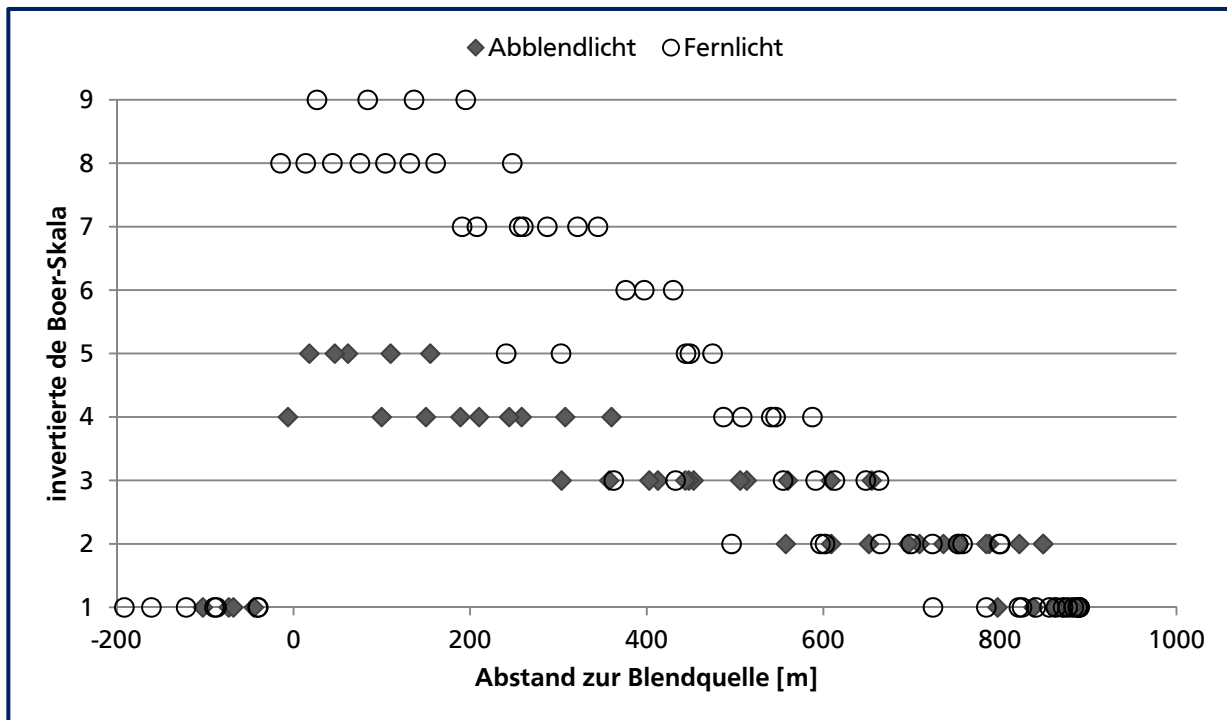


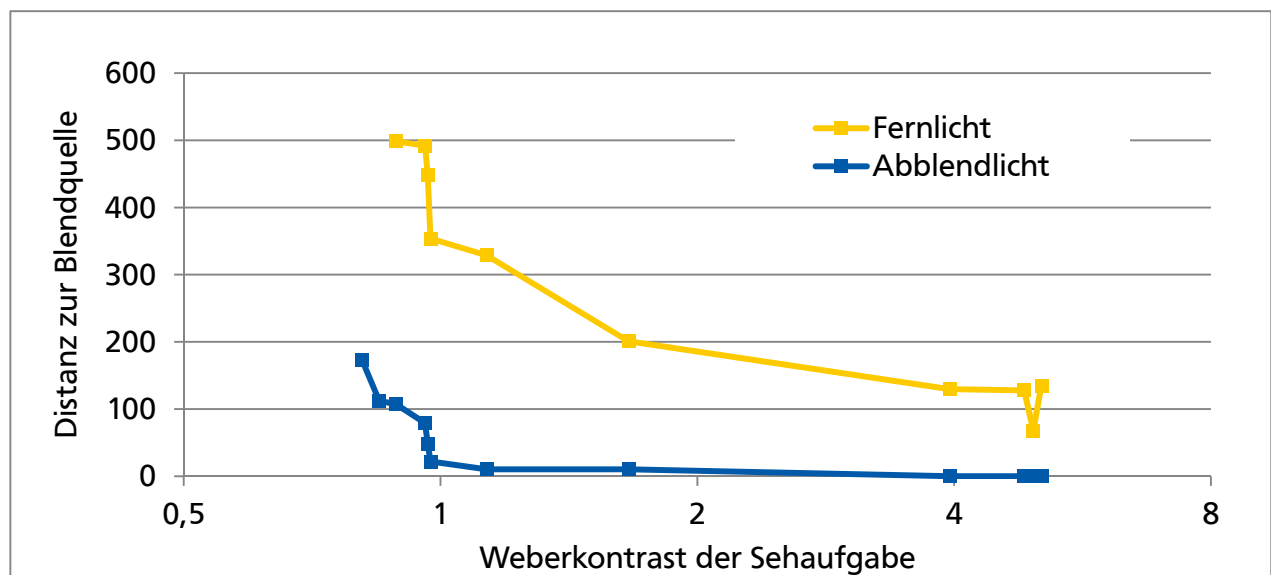
Abbildung 65: Exemplarische Untersuchungsergebnisse zur psychologischen Blendung in Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand für eine einzelne Testperson.

### 6.4.5 Ergebnisse der dynamischen Probandenversuche

Dieser Abschnitt stellt die Resultate der Probandenversuche ausführlich dar. Dabei werden die Resultate der physiologischen Blendung hinsichtlich der unterschiedlichen tolerierbaren Blendbelastung unter Fernlicht und Abblendlicht aufgezeigt. Aus den Ergebnissen werden die geometrischen Bedingungen hergeleitet, bei denen die unter beiden Blendungsszenarien dieselbe Beeinträchtigung gemessen werden kann. Zusätzlich wird aufgezeigt, wie sich die Reaktionszeiten der Probanden entwickeln, wenn sie sich dem Punkt nähern, ab dem die Sehaufgabe nicht mehr gelöst werden kann.

#### Auswertung nach Begegnungsabstand (physiologische Blendung)

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, wird zur Bewertung der Blendung der Abstand herangezogen, bei dem der betreffende Proband das Sehzeichen gerade noch erkannt hat. Die Abbildung 67 zeigt die durchschnittlichen Ergebnisse der Probanden.



**Abbildung 66:** Entwicklung der Lösungsentfernung über dem dargebotenen Kontrast der Sehaufgabe  
Die Ordinate zeigt den Abstand, ab dem nur noch 50% der Probanden in der Lage sind, die Sehaufgabe korrekt zu lösen. Ein Abstand von null Metern bedeutet, dass die Aufgabe immer korrekt gelöst wird.

Jeder Grauwert (Code Value) auf der Abszisse entspricht einem Leuchtdichtekontrast, der in Abbildung 57 dargestellt ist. Nimmt der Grauwert ab, so nimmt die Distanz zu, bei der die Probanden nicht mehr in der Lage sind, die Sehaufgabe korrekt zu erkennen (Ordinate). Der Unterschied der beiden dargestellten Kurven liegt in der verschiedenen starken Blendung der Probanden begründet. So stellt die untere Kurve den Verlauf für eine Blendung mit Abblendlicht dar, die obere Kurve dagegen den Verlauf unter Fernlichteinfluss.

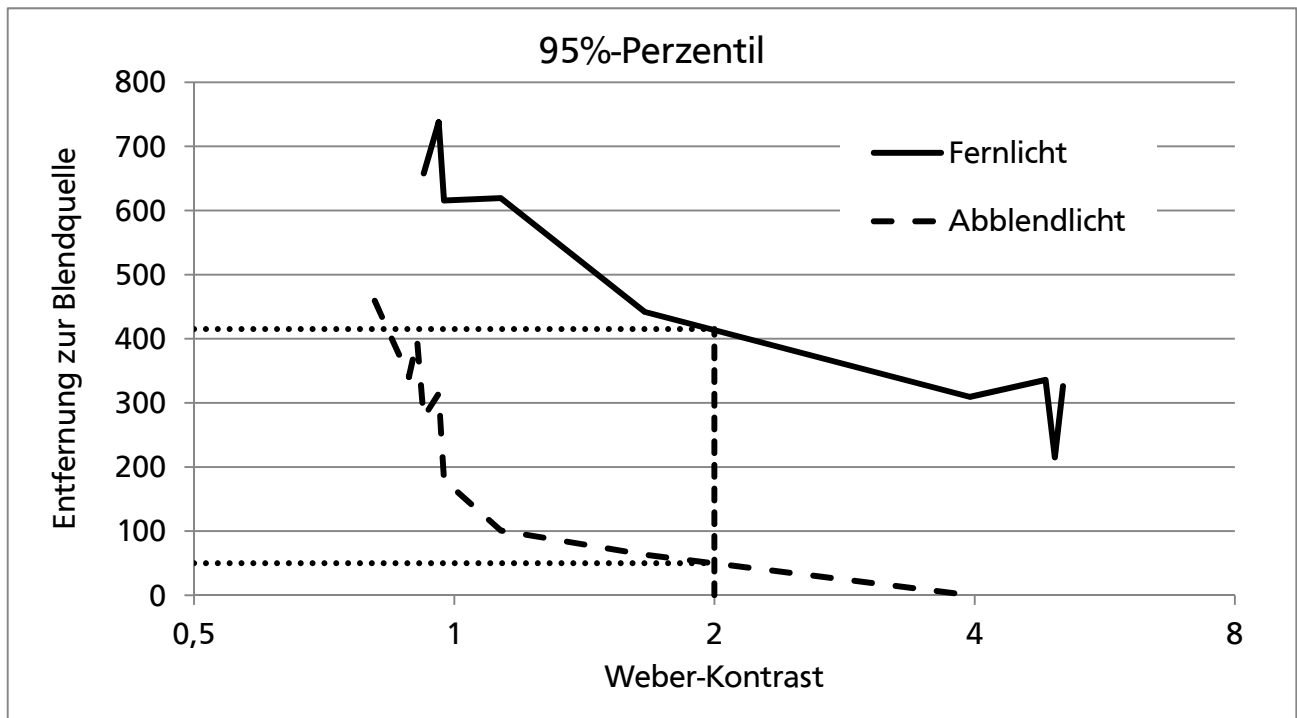
Ziel eines adaptiven Fernlichtsystems ist es, die Blendung des Gegenverkehrs durch Scheinwerfer zu minimieren und gleichzeitig die maximale mögliche Sichtweite für den Fahrer zu ermöglichen. Wie zu erwarten ist, beeinflusst die Blendung durch Fernlicht den Gegenverkehr erheblich stärker in seiner Fähigkeit, die Sehaufgabe richtig zu lösen, als das Abblendlicht. Eine Blendung, die durch Abblendlicht hervorgerufen wird, das den gültigen ECE-Vorschriften entspricht und korrekt eingestellt ist, muss toleriert werden. Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass die Erkennbarkeit von Objekten minimal ist, wenn der Gegenverkehr sich 50 m vor dem eigenen Fahrzeug befindet. Daher kann die Blendbelastung eines Abblendlichtes bei dieser Entfernung herangezogen werden, um eine zu tolerierende Belastung durch Fernlicht zu definieren.

Da es in der Praxis nicht ausreicht, wenn 50% der Probanden die Aufgabe richtig lösen, wird das 95%-Quantil zur Bestimmung herangezogen. Dessen Verlauf zeigt Abbildung 67. Die ersten Fehler unter Einfluss von Abblendlicht und 50m Begegnungsabstand lassen sich bei einem Weberkontrast der Sehaufgabe von  $C_w = 2$  feststellen. Bei diesem Kontrast liegt der Abstand, bei dem unter Fernlicht die gleiche Fehlerrate erzeugt wird, bei 413 m. Neben den Tests zur Messung der physiologischen Blendung wurden die Probanden ebenfalls zur Bewertung der Blendung durch ein entgegenkommendes Fahrzeug aufgefordert.

Ähnliche Versuche wurden schon in früheren Untersuchungen durchgeführt. Beispielsweise verglich HUMMEL die psychologische Blendwirkung von Xenon- und LED-Scheinwerfern mit einem ähnlichen Konzept im dynamischen Versuch. Allerdings wurde dort nur die beiden Schwellen ermittelt, bei der die Testpersonen sich wünschten, der Entgegenkommende würde abblenden (Hummel nennt diese Schwelle in diesem Zusammenhang „discomfort glare“) bzw. ab der die Testpersonen unerträglicher



Blendung („unbearable glare“) ausgesetzt sind. Frühere Studien waren in der Mehrzahl durch einen statischen Versuchsaufbau bestimmt.



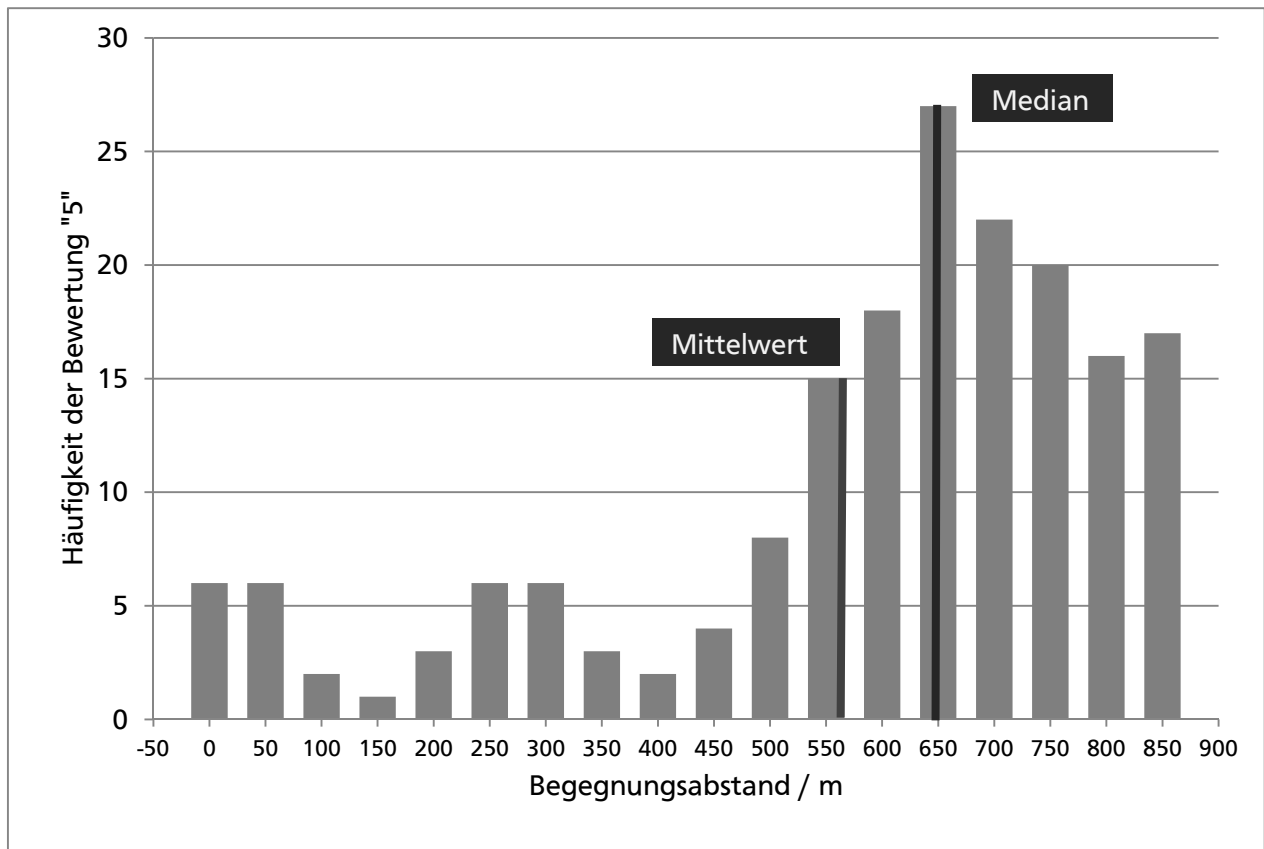
**Abbildung 67:** Entwicklung der Lösungsentfernung über dem dargebotenen Weber-Kontrast  
Dargestellt ist der Abstand, bei dem noch 95% aller Testteilnehmer in der Lage sind, die Sehaufgabe korrekt zu lösen in Abhängigkeit vom dargebotenen Weber-Kontrast der Sehaufgabe. Ein Abstand von null Metern bedeutet, dass die Aufgabe immer korrekt gelöst wird.

#### Auswertung nach Begegnungsabstand (psychologische Blendung)

Um aus der Bewertung der Blendungsintensität durch die Probanden eine Aussage über die zumutbare Blendung zu extrahieren, ist diejenige Entfernung zu bestimmen, bei der sich die Testpersonen zu einem überwiegenden Teil noch nicht übermäßig gestört fühlen. Bei der verwendeten modifizierten DeBoer-Skala ist dies eine Bewertung mit der Stufe 5 („gerade akzeptabel“). Abbildung 68 zeigt die Verteilung der Nennung der Bewertungsstufe 5 über dem Begegnungsabstand. Der Median und auch das Maximum dieser Verteilung liegt bei 650 m, Der Mittelwert bei 585 m. Bei größeren Abständen überwiegen die niedrigeren, also weniger kritischen Bewertungen. Zu kleineren Abständen hin nimmt die Häufigkeit stark ab. Auf Abstände von 400 m und darunter entfallen nur noch 19,2 % der Gesamtzahl an Nennungen. Nur insgesamt drei Probanden gaben ab dieser Entfernung noch eine entsprechende Bewertung ab. Die bisherige Betrachtungsweise bezieht sich auf die Gesamtzahl aller „5“-Bewertungen. Interessant ist dementsprechend ebenfalls, wann die erste Bewertung der Stufe „6“ pro Fahrt erfolgt ist.

Die Grenze zwischen tolerierbarer und störender Blendung (BCD – Boundary between Comfort and Discomfort Glare) wäre demnach die erstmalige Nennung der Bewertungsstufe 6. Das Abblendlicht wird von keiner Testperson mit einer Bewertung schlechter als 5 („gerade akzeptabel“) bewertet. Daher wird auf dessen Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Das 95%-Perzentil der Verteilung des erstmaligen Überschreitens der Stufe 5 stimmt gut mit dem Maximum der Häufigkeit der Bewertung „5“ überein. In 5% der Fahrten wird also bereits ab einem Begegnungsabstand von 700 m eine übermäßige Blendung wahrgenommen.

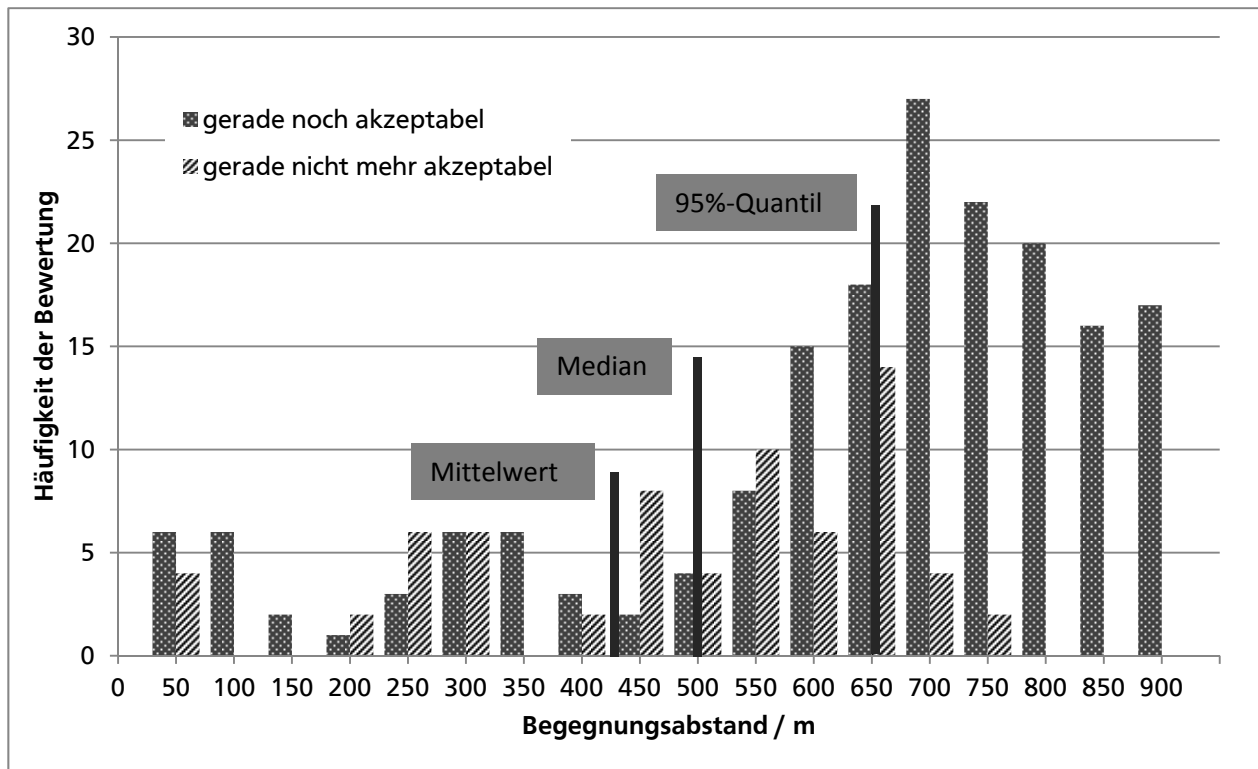


**Abbildung 68:** Absolute Häufigkeit der Nennung der Bewertungsstufe „gerade akzeptabel“ über dem Begegnungsabstand und deren Median

Die Ergebnisse ähneln den Befunden des Versuches von HUMMEL stark. Auch wenn die Fragestellung in dem Fall differierte, so sind die Gemeinsamkeiten unübersehbar. HUMMEL fragte seine Probanden zwar nicht nach der modifizierten DeBoer-Skala, aber erstens danach, wann sie sich ein Abblenden des Gegenverkehrs wünschten und zweitens danach, wann die Blendung unerträglich wurde. An dieser Stelle muss allerdings daraufhin gewiesen werden, dass die Probanden in dem Versuch von Hummel auf die Blendquelle fixieren durften, was nicht dem Szenario dieser Studie entspricht, da die Probanden sich hier auf die eigene Fahrbahn zu konzentrieren hatten.

Die Probanden wünschten im Test von Hummel im Durchschnitt ein Abblenden bei einem Begegnungsabstand von 633 m, was in dieser Studie der erstmaligen Bewertung „6“ entspräche. Im Mittel fordern die Probanden in der vorliegenden Arbeit ein Abblenden bei 500 m Begegnungsabstand (Median), der Mittelwert liegt bei 432 m und damit zufälligerweise im Bereich der Abblendentfernung, die auch für die physiologische Blendung ermittelt wurde. Die Differenz zu Hummel könnte durch das unterschiedliche Fixationsverhalten erklärt werden.

Wie schon bei der Auswertung der physiologischen Tests kann jedoch auch in diesem Fall nicht der durchschnittliche Abblendwunsch entscheidend sein, denn dies würde bedeuten, dass die Hälfte aller Beobachter ein nach diesem Kriterium ausgelegtes System als belästigend ablehnen würde. Es ist daher ratsam, sich am 95%-Quantil der Verteilung zu orientieren, welches bei 650 m liegt.



**Abbildung 69:** „Border between Comfort and Discomfort“ in Abhängigkeit vom Begegnungsabstand  
Das Diagramm zeigt die absolute Häufigkeit der Nennung der Bewertungsstufe „gerade akzeptabel“ (dunkel) und die Häufigkeit der ersten Nennung der Stufe „6“ (gerade nicht mehr akzeptabel, hell schraffiert) und deren 95%-Perzentil, Mittelwert und Median über dem Begegnungsabstand

## 6.5 Auswertung nach Reaktionszeit

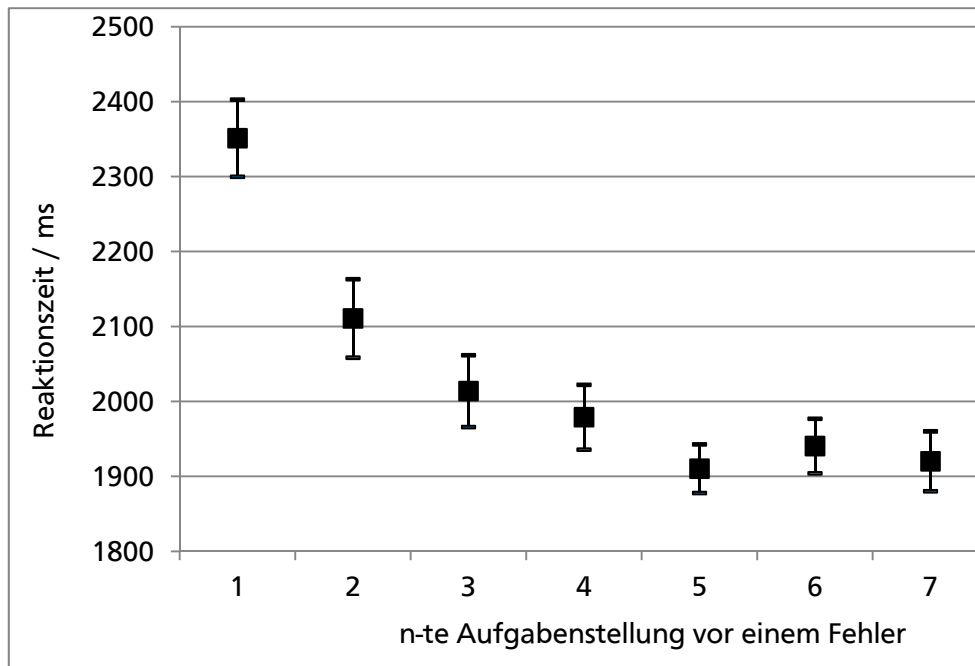
Eine Auswertung nach der Reaktionszeit der Probanden liefert ebenfalls gut verwertbare Daten, um die aus der Analyse des Begegnungsabstandes gewonnen Aussagen zu untermauern.

Es ist zwar nicht immer eine bis zum Versagen der Erkennung linear ansteigende Reaktionszeit erkennbar, jedoch bleibt die Zeit zwischen Darbietung des Reizes und der Reaktion grundsätzlich auf einem konstanten Niveau und steigt dann während der letzten drei bis vier Darbietungen vor dem erstmaligen Nichterkennen signifikant an. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 70.

Dieser Anstieg ist typisch für einen Fehler, der aufgrund der schwieriger werdenden Sichtbedingungen durch den Blendeinfluss zustande kommt. Für Fehler, die durch Verwechslung von links und rechts oder durch eine äußere Ablenkung entstehen, kann ein vorheriges Ansteigen der Reaktionszeit nicht beobachtet werden. Damit ist die Betrachtung der Reaktionszeit ein gutes Mittel, um zufällige Fehler von den blendungsinduzierten zu diskriminieren.

## 6.6 Bewertung der Ergebnisse der dynamischen Versuche

In dieser Arbeit werden Freifelduntersuchungen unter realistischen Freifeldbedingungen und entsprechenden Geometrien durchgeführt und die sich ergebende physiologische sowie psychologische Blendung gemessen. Erstmals kann der Einfluss der Blendung im fahrenden Auto unter kontrollierten Bedingungen gemessen werden.



**Abbildung 70:** Entwicklung der Reaktionszeit über der Aufgabenanzahl  
 Die Reaktionszeiten steigen vor dem erstmaligen Auftreten eines Fehler signifikant an. Die Zahlen auf der Abszisse geben die Anzahl der Aufgaben vor dem Fehler an. „1“ bedeutet also „letzte korrekt gelöste Aufgabe vor einem Fehler“, „2“ bedeutet „vorletzte korrekt gelöste Aufgabe vor einem Fehler“ usw.

Die Untersuchungen zeigen deutlich auf, dass ab einem Begegnungsabstand von 400 m unter Fernlichtbenutzung ein Zustand beim Entgegenkommen erreicht wird, der einer Blendung mit Abblendlicht bei 50 m entspricht. Es kann daher eine klare Empfehlung dafür gegeben werden, dass technische Einrichtungen, die zur Regelung von adaptiven Fernlichtsystemen genutzt werden, in der Lage sein müssen, Entgegenkommende ab dieser Entfernung sicher zu erkennen und zu entblenden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Empfehlungen von HELMERS und RUMAR. Diese hatten eine optimale Abblendentfernung in Abhängigkeit von der Detektionsweite der Autofahrer mit 250..400 m angegeben (vgl. [159], [160]).

Unter anderem diese Ergebnisse sind in die Überarbeitung der Regelungen ECE R 48 und R 123 eingeflossen, die die Anforderungen regeln unter denen adaptive Fernlichtsysteme generell zulassungsfähig sein werden [55].

Es wird des Weiteren gezeigt, dass die psychologische Blendung schon etwa 250 m früher bei 5% der Probanden zum Wunsch des Abblendens führt. Um eine hohe Akzeptanz der Systeme auch unter Autofahrern ohne entsprechende Ausstattung zu erreichen, wäre es daher sinnvoll, die Erkennungsreichweite der Systeme auf diese auszudehnen. Dieses dürfte jedoch unter den gegebenen technischen Bedingungen schwierig werden.

Bei der Diskussion über die Abblendentfernung der Systeme ist allerdings nicht aus den Augen zu verlieren, wie häufig eine derart lange Gerade im deutschen Straßennetz überhaupt vorkommt. Unter Umständen ist es daher wichtiger die Reaktionszeit der Systeme möglichst gering zu halten und deren Fehlerrate zu minimieren.

---

## 7 Diskussion und Ausblick

Im Folgenden sollen die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst werden. Die verwendeten Methoden werden kritisch diskutiert und es werden im Ausblick Möglichkeiten vorgeschlagen, wie zukünftige Versuchsaufbauten gestaltet werden können, um noch realistischere Fahr- und Sehaufgaben zu ermöglichen.

### 7.1 Ergebnisse der Arbeit

Diese Arbeit analysiert die wichtigsten deutschen und internationalen Rechtsquellen hinsichtlich der Realisierbarkeit eines adaptiven Fernlichtsystems innerhalb der geltenden Bestimmungen. Es wird außerdem aufgezeigt, welches Verhaltensrecht in Deutschland und weiteren Ländern gilt, welches durch ein solches System eingehalten werden muss. Die Machbarkeit wird anhand eines Systems „Gleitende Leuchtweite“ diskutiert, das Ergebnis ist aber auch durchaus auf andere Fernlichtsysteme wie die vertikale Hell-Dunkel-Grenze oder einen LED-basierten Matrix-Beam übertragbar.

Die sich aus den Rechtsquellen ergebenden Standards müssen durch die Systeme erfüllt werden. Da allerdings viele Vorschriften vage formuliert sind, werden in dieser Arbeit Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage zur Dimensionierung und Funktionsgestaltung neuer adaptiver Fernlichtsysteme dienen können.

Um die Potenziale zur Unfallreduktion durch bessere Beleuchtung aufzuzeigen, werden die zur Verfügung stehenden nationalen und internationalen Quellen zur Verkehrsstatistik analysiert. Eine seriöse Abschätzung der zu erwartenden Reduktion der Unfallzahlen durch adaptive Systeme ist sicher nicht möglich. Festzuhalten bleibt aber, dass Wildunfälle und außerörtliche Fußgängerunfälle mit hoher Wahrscheinlichkeit verhindert werden könnten. Immerhin sind Wildunfälle für 1% aller Personenschäden im Verkehr verantwortlich. Die Tatsache, dass in der dunklen Jahreszeit mehr als doppelt so viele Fußgänger tödlich verunglücken wie im Hochsommer, lässt ebenfalls darauf schließen, dass durch adaptive Fernlichtsysteme eine hohe Reduktion dieser Zahlen möglich sein wird.

Der Einfluss der Fernlichtsysteme ist jedoch nur dann möglich, wenn diese eine spürbare Erhöhung der Fernlichtnutzung ermöglichen. Deshalb werden die Potenziale von Fernlichtsystemen erörtert. Im Fahrversuch mit Probanden zeigt sich, dass die Möglichkeiten mit Fernlicht auf außerörtlichen Straßen zu fahren, nicht voll ausgeschöpft werden. Automatische Systeme könnten die Nutzungsdauer des Fernlichtes in etwa verdoppeln (auf ca. 60 % der Fahrzeit), wenn die gewonnenen Erkenntnisse zugrunde gelegt werden. Diese Beschreibung gilt nur für die Fernlichtassistenten. Laut BÖHM können Systeme mit adaptiver Lichtverteilung wie der gleitenden Leuchtweite in bis zu 90 % der Fahrzeit aktiv sein und einen Leuchtweitevorteil gegenüber der Abblendlichtverteilung erzielen, was dem dreifachen der gemessenen Zeit für manuelle Bedienung entspräche. Ebenfalls kann Blendung durch vergessenes oder zu spätes manuelles Abblenden verringert werden. Die Probanden im Test vergaßen in etwa 15 % der Fälle abzublenden.

Auch wenn die Leuchtweite durch adaptive Systeme gesteigert werden kann, stellt sich dennoch die Frage, ob die Autofahrer die gewonnene Leuchtweite auch nutzen und sich die Detektionsweite entsprechend erhöht. Dieser Frage wurde durch einen Probandentest in Zusammenarbeit mit HUMMEL nachgegangen. Es zeigt sich, dass die mittlere Detektionsweite gesteigert werden kann. Dabei ergeben

---

sich erhöhte Detektionsweiten von 14-18 m, je nach betrachtetem System. Der durchgeführte Test ist jedoch aufgrund der bereits diskutierten Schwächen weniger aussagekräftig als gewünscht. Akzeptiert man die Ergebnisse jedoch, so würde die erzielte zusätzliche Detektionsweite dem Fahrer also 0,6-0,8 s mehr Zeit gewähren, um eine Kollision zu vermeiden. Diese Zeit entspricht der allgemein anerkannten Reaktionszeit eines Fahrers während der Hellstunden. Es ist also von einem großen Effekt auf die Unfallzahlen mit unbeleuchteten Hindernissen auszugehen.

Bei aller Zuversicht, was die positiven Einflüsse der neuen Systeme auf die nächtliche Sicherheit angeht, muss jedoch auch besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Blendung für den Gegenverkehr gelegt werden. Es muss gewährleistet sein, dass die automatischen Systeme ebenso gut entblenden, wie dies bei konventionellem Fernlicht manuell gemacht wird. Jedoch sind den kamerabasierten Systemen Grenzen durch Auflösung und Dynamikbereich gesetzt, die dazu führen, dass Objekte nicht in beliebiger Entfernung erkannt werden können. Entsprechend der weit anerkannten Verfahrensweise, werden in dieser Arbeit Kriterien ermittelt, die darauf abzielen, dass die Fernlichtsysteme nie mehr Blendung verursachen, als Abblendlicht bei einem Begegnungsabstand von 50 m.

In statischen Versuchen konnte aufgezeigt werden, dass die physiologische Einschränkung der Sehleistung durch Blendung durch Fernlicht bis zu 400 m den bisher angewandten Gesetzen von Holladay und Schmidt-Clausen durchaus genügt. Jedoch ist der Einfluss des Blendwinkels im Außenversuch geringer als im Labor. Dadurch könnte die Lichtstärke eines adaptiven Fernlichtsystems in Richtung des Auges des Entgegenkommenden in Abhängigkeit des Abstandes leicht erhöht werden.

Dynamische Fahrversuche zeigen, dass ein negativer Einfluss eines Fernlichtes auf die Sehleistung ab einer Entfernung von 400 m nicht über der eines Abblendlichtes in 50 m Entfernung liegt. Demnach sollten alle eingesetzten Kamerasysteme in der Lage sein, Objekte (Scheinwerfer und Rückleuchten) in dieser Entfernung zweifelsfrei zu identifizieren.

Ein signifikanter Einfluss der Lichtquelle bzw. Emissionsspektrums eines blendenden Scheinwerfers auf die Sehleistung konnte nicht nachgewiesen werden.

Insgesamt präsentiert die Arbeit eine umfassende Untersuchung des komplexen Themas der Auswirkungen neuartiger lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. Die Ergebnisse könnten Grundlage neuer Regelungen der ECE sein, die die Funktionsweise dieser Systeme möglichst praktikabel beschreiben und reglementieren sollte.

## **7.2 Anregungen für zukünftige Arbeiten**

Die Forschungen zum menschlichen Bedienverhalten des Fernlichtes und dessen Vergleich mit den möglichen Einschaltzeiten und Bedienungsfehlern sollte nach Markteinführung der Systeme mit den tatsächlich erreichten Leistungen der Serienprodukte verglichen werden. Dies wäre während dieser Arbeit nur mit Prototypen möglich gewesen, auf deren Hardware und Protokolle nicht zugegriffen werden konnte.

Auch die tatsächliche Performanz der Seriensysteme sollte durch einen standardisierten Test nachvollziehbar gemacht werden. Vorgeschrieben sind derzeit für AFS-Systeme ohnehin Beurteilungsfahrten durch den Technischen Dienst, der mit der Anfertigung des Gutachtens für die Homologation beauftragt wurde. Um eine Verbesserung des Testes dieser Arbeit (Kapitel 4) zu erreichen, sollte darauf Wert gelegt werden, dass die Sehziele in ausreichender Anzahl vorhanden sind. Diese sollten allerdings in ihrer Position variabel sein. Dies könnte beispielsweise durch klappbare Sichtziele erreicht werden, von denen während jeder Fahrt unterschiedliche Kombinationen sichtbar sind. Damit würde

---

der Lerneffekt der Testfahrer verhindert. Zudem sollte das benutzte Testgelände über ausreichende Geradenlängen (deutlich über 400 m) verfügen und einen üblichen Straßenbelag mit normaler Welligkeit aufweisen.



---

## Literaturverzeichnis

- [1] **Economic Commission for Europe**, "Uniform Provisions Concerning the Approval of Adaptive Front-Lighting Systems (AFS) for Motor Vehicles", UNITED NATIONS, 2007.
- [2] **Statistisches Bundesamt**, "Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2008". Wiesbaden, Gruppe I D, Pressestelle, in Zusammenarbeit mit Gruppe V C "Verkehrsunfälle", 2009.
- [3] **National Highway Traffic Safety Administration**, "2008 Traffic Safety Annual Assessment - Highlights", NHTSA' National Center for Statistics and Analysis, Washington DOT HS 811 172, 2008.
- [4] **Transport Canada**. (2007, "Canadian Motor Vehicles Traffic Collision Statistics: 2006", [<http://www.tc.gc.ca/roadsafety/tp/tp3322/2006/page1.html>].
- [5] **Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid**. (2007, "International comparability of road safety data", [[http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/UK/FS\\_International\\_comparability\\_data.pdf](http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/UK/FS_International_comparability_data.pdf)].
- [6] **European Commission**, "White Paper - European transport policy for 2010". Luxembourg, Office for official publications of the European Communities, 2001, 92-894-0341-1.
- [7] **European Commission**, "Keep Europe moving - Sustainable mobility for our continent", Brüssel, Communication from the Commission to the Council and the European Parliament COM(2006) 314 final, 2006.
- [8] **Statistisches Bundesamt**, "Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2010". Wiesbaden, 2011.
- [9] **Kearns, H. and Kidd, D.** (2011, 17.07.). "Road safety: EU road fatalities fall by 11% in 2010 ". Verfügbar: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/830>
- [10] **Economic Commission for Europe**, "Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America", United Nations, Geneva, 2007.
- [11] **Wilske, J., et al.**, "Unfallforschung 2006, Vorläufiger Ergebnisbericht der Unfallforschung im Jahr 2006", Landespolizeidirektion Saarland, Saarbrücken, 2006.
- [12] **Haferkemper, N., et al.**, "Untersuchung zum Einsatz von LED-Tagfahrlicht an Motorrädern", Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. Jahrgang 111., S. 8, 2010 2009.
- [13] **Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer.**. (2008, "Les grandes dates de la sécurité routière", [[http://www2.securiteroutiere.gouv.fr/IMG/Synthese/SY\\_GDSR.pdf](http://www2.securiteroutiere.gouv.fr/IMG/Synthese/SY_GDSR.pdf)].
- [14] **Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer.**. (2009, "Analyse de l'année 2008", [[http://www2.securiteroutiere.gouv.fr/IMG/Synthese/SY\\_GEN.pdf](http://www2.securiteroutiere.gouv.fr/IMG/Synthese/SY_GEN.pdf)].
- [15] **Kaltenbach, A.**, "Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur adaptiven Anpassung der Lichtsignale an variable Sichtbedingungen", Technische Universität Ilmenau, FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU, Ilmenau, Dissertation, 2009.
- [16] **Technische Universität Darmstadt**. (2009, "PRORETA-Projekt". Verfügbar: <http://www.proreta.de/>
- [17] **Vorndran, I.**, "Unfallentwicklung auf deutschen Strassen 2009". Wiesbaden, Statistisches Bundesamt, 2010.
- [18] **Statistisches Bundesamt**, "Statistisches Jahrbuch 2010". Wiesbaden, Silvia Krings et al., 2010, 978-3-8246-0898-0.

- 
- [19] **National Office for Statistics.** Road traffic and distribution of accidents on major roads [Online]. Verfügbar: <http://www.statistics.gov.uk/STATBASE/Expodata/Spreadsheets/D7815.xls>
- [20] **Kathmann, T., et al.,** "Straßenverkehrszählung 2005 : Ergebnisse". Bremerhaven, Wirtschaftsverl. NW, 2007, 978-3-86509-762-0; 0943-9331.
- [21] **Reichart, G.,** "Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen", Als Ms. gedr.. Düsseldorf, VDI-Verl., 2001, 3-18-300722-3; 1439-958X.
- [22] **Tomasch, E.,** "Entwicklung und systematische Verwertung einer In-Depth Datenbank tödlicher Verkehrsunfälle", Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Graz, Graz, 2007.
- [23] **Steinbrecher, J. and Schubert, T.,** "Landesstraßen - eine vernachlässigte Straßenkategorie", Universität Siegen, FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN, LEHR- UND FORSCHUNGSGEBIET STADT- UND VERKEHRSPLANUNG, 2008.
- [24] **Hummel, B.,** "Blendfreies LED-Fernlicht", Dissertation, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Ingolstadt, 2009.
- [25] **Bakker, J.** (2010, 04.11). "German In-Depth Accident Study". Verfügbar: <http://www.gidas.org>
- [26] **Sullivan, J. M. and Flannagan, M. J.,** "The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions", Accident Analysis and Prevention, Vol. 34, S. 487-498, 2002.
- [27] **Hristov, B.,** "Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen", PhD Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften, Technische Universität Dresden, Dresden, 2009.
- [28] **Harruff, R. C., et al.,** "Analysis of circumstances and injuries in 217 pedestrian traffic fatalities", Accident Analysis and Prevention, Vol. 30, S. 11-20, 1998/05/23 1998.
- [29] **Lukaschek, H.,** "Erkennbarkeit im Straßenverkehr - Lichttechnische Zusammenhänge und Unfallgeschehen", Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen im österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein, Vol. 99, S. 72-75, 1991.
- [30] **Owens, D. A. and Sivak, M.,** "The role of reduced visibility in nighttime road fatalities", 1993.
- [31] **Kühn, M.,** "Fußgängerschutz". Berlin, Springer, 2007, 3-540-34302-4.
- [32] **Transport Canada,** "Pedestrian Fatalities and Injuries, 1992-2001", 2004.
- [33] **Musahl, H.-P.,** "Gefahrenkognition". Heidelberg, Asanger, 1997, 3-89334-274-5.
- [34] **Schäbe, H.,** "Statistische Analyse der Unfallhäufigkeit bei Dunkelheit mit Halogen- bzw. Xenonlicht", Interner Bericht Nr. TRIT/201/13100716, 2007.
- [35] **Schäbe, H. and Schierge, F.,** "Investigations on the Influence of Car Lighting on Nighttime Accidents in Germany", in 7th International Symposium on Automotive Lighting, Technische Universität Darmstadt, KHANH, T. Q., München: Utz Verlag, 2007, pp. 1-5, 978-3-8316-0711-2.
- [36] **Sprute, J. H., et al.,** "Lichttechnisches Gutachten zum Unfallgeschehen Hof-Töpen", im Fachgebiet Lichttechnik vorhanden, Darmstadt, 2008.
- [37] **Eckert, M.,** "Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr". München, Verlag Technik, 1993, ISBN 3-341-01072-6.
- [38] **Adrian, W.** (1996) Die Unterschiedsempfindlichkeit des menschlichen Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. *Lichttechnik, Berlin* 21.
- [39] **Blackwell, H. R.,** "Contrast Thresholds of the Human Eye", Journal of the Optical Society of America, Vol. 36, S. 624-632, 1946.
- [40] **Hentschel, P., et al.,** "Straßenverkehrsrecht". München, C. H. Beck, 2007, 978 3 406 554780.
-

- 
- [41] **Jagow, J., et al.**, "Straßenverkehrsrecht". München, C. H. Beck, 2006, Elektronische Quelle, einsehbar über ULB Darmstadt.
- [42] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung**, "Straßenverkehrsordnung". Bonn, Bundesanzeiger-Verlag, 1970.
- [43] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung**, "Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung". Bonn, Bundesanzeiger Verlag, 2006.
- [44] **Hummel, B.**, "Matrix-Beam: The Antiglarung LED-Highbeam", SPIE Industry Perspectives, Straßbourg Konferenzbeitrag, im Fachgebiet Lichttechnik vorhanden, 2008.
- [45] **Lerner, M., et al.**, "Das Unfallgeschehen bei Nacht", Vol. M 172. Bergisch Gladbach, Wirtschaftsverlag NW, 2005, 3-86509-364-7.
- [46] **Schmidt-Clausen, H.-J.** (1979) Über die Verbesserung der Sehleistung im Begegnungsverkehr durch das kontinuierliche Abblenden (Dimmen) des Fernlichtes. *Automobiltechnische Zeitschrift*.
- [47] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung**, "Elektronisches Vorschaltgerät zur Verzögerten Abschaltung des Fernlichtes", Heft 3, 1980.
- [48] **Europäische Kommission**, "Richtlinie 98/14/EG der Kommission vom 6. Februar 1998 zur Anpassung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger an den technischen Fortschritt", 1998.
- [49] **Rat der Europäischen Gemeinschaft**, "Richtlinie des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger", 1970.
- [50] **Kraftfahrt-Bundesamt**, "Merkblatt zur Richtlinie 98/14/EG "Neue Technologien oder Merkmale" (MTM), gem. Art. 8, Abs. 2, Buchstabe c", KRAFTFAHRT-BUNDESAMT, Ed., ed. Ort der Veröffentlichung, 1998.
- [51] **Society of Automotive Engineers**. (2002, September) SAE Recommended Practise J2591: Adaptive Forward Lighting Systems (AFS).
- [52] **Land, T. L.** (2009, "What Every Driver Must Know", [\[http://www.michigan.gov/documents/wedmk\\_16312\\_7.pdf\]](http://www.michigan.gov/documents/wedmk_16312_7.pdf).
- [53] **Queen's Printer for Ontario**, "Highway Traffic Act", 2006.
- [54] **Secrétariat général du Gouvernement de la Republique Française**, "Le Code de la Route", ed. Ort der Veröffentlichung, 2001.
- [55] **Groupe Travail de Bruxelles 1958**, "Proposal for Amendments to Regulations 48 and 123", ed. Ort der Veröffentlichung: Groupe de Rapporteur Éclairage, 2010.
- [56] **Grimm, M. and Casanave, S.**, "Dynamic Bending Light: An Innovative Technology for Today and the Future", in *SAE World Congress*, Detroit, MI, USA, 2007.
- [57] **Berlitz, S., et al.**, "Assistenzsysteme zur Verbesserung der Sicht bei Tag und Nacht", *Automobiltechnische Zeitschrift extra*, Vol. Der neue Audi A6, 2011.
- [58] **Funk, C.**, "Heterogeneous data fusion to control a predictive bending light", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 253-256, 978-3-8316-0904-8.
- [59] **Dreier, B. and Rosenhahn, E.-O.**, "Camera Controlled Adaptive Cut-of and Adaptive Partial High Beam Applications", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 278-286, 978-3-8316-0904-8.

- 
- [60] **Grimm, M.**, "Trends in Automotive lighting, new technology and its benefits for end-users", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 336-341, 978-3-8316-0904-8.
- [61] **Schmidt, C., et al.**, "Illumination Strategies for Dynamic Headlamp Functions like Adaptive and Vertical Cut-Off Line", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 268-277, 978-3-8316-0904-8.
- [62] **Enders, M.**, "Pixel Light", in *Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt, 2001, S. 234-239, 3-89675-971-X.
- [63] **Griesinger, M., et al.**, "Multifunctional Use of Semiconductor-Based Car Lighting systems: Potentials and Challenges", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2005, S. 73-81, 3-8316-0499-1.
- [64] **Hummel, B.**, "Matrix-Beam - an Adaptive Driving Beam System (ADB)", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, 978-3-8316-0904-8.
- [65] **Mellinghoff, U., et al.**, "The Mercedes-Benz Experimental Safety Vehicle 2009", in *Enhance Safety of Vehicles Conference*, Stuttgart, 2009, S. 11.
- [66] **Schneider, D.**, "Marking Light: System approaches and potential to reduce accidents", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 307-313, 978-3-8316-0904-8.
- [67] **Moisel, J., et al.**, "Adaptive Headlights utilizing LED-Arrays", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 287-296, 978-3-8316-0904-8.
- [68] **Deutscher Verkehrsexpertentag.** (2008, Juni 09.-10). "Entschliefungen des Deutschen Verkehrsexpertentages 2008". Verfügbar: <http://www.verkehrsexpertentag.de/EntschlVET08.pdf>
- [69] **Sullivan, J. M., et al.** (2004) High-beam headlamp usage on unlighted rural roadways. *Lighting Research and Technology*. 59-67.
- [70] **Schmidt-Clausen, H.-J. and Diem, C.**, "AFS - Project Task 2 Dynamic Glare", Darmstadt, Forschungsbericht, 1998.
- [71] **Schwab, R. and Hermion, R.** (1972) Improvement of visibility for night driving. *Public Roads*. 257-267.
- [72] **Mefford, M. L., et al.**, "Real-World Use of High-Beam Headlamps", Eigenverlag: im Fachgebiet Lichttechnik vorhanden, Ann Arbor, Michigan, Research Report UMTRI-2006-11, 2006.
- [73] **Mefford, M. L., et al.**, "Real-World Use of High-Beam Headlamps", in *International Symposium on Automotive Lighting*. Vol. 12, KHANH, T. Q., Darmstadt: Herbert Utz Verlag, 2007, pp. 363-368, 978-3-8316-0711.
- [74] **Statistisches Landesamt Baden-Württemberg.** (2007, "Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr in Baden-Württemberg seit 1980 nach Straßenkategorien und Fahrzeugarten". Verfügbar: <http://statistikportal.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/v5c01.asp>
- [75] **Wilde, G. J. S.**, "Target Risk". Toronto, Canada, PDE Publications, 1994, 0-9699124-0-4.
- [76] **Hohm, A.**, "Physiologische und Photometrische Untersuchungen zur Herleitung von Randbedingungen für eine Abblendautomatik", im FG Lichttechnik vorhanden, Darmstadt, Studienarbeit, 2005.
- [77] **Böhm, M., et al.**, "Efficacy of Adaptive Front-Lighting Systems - A Field Study Under Further Consideration of Drivers' Customary High Beam Usage Behaviour", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2009, S. 238-242, 978-3-8316-0904-8.
-



- 
- [78] **Cieler, S.**, "Auswirkungen eines dynamischen Halogenkurvenlichtes auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit", TÜV Kraftfahrt GmbH, Augsburg, 2003.
- [79] **Grimm, M. and Casenave, S.**, "DBL: A Feature that Adds Safety to Night Time Traffic", in *International Symposium on Automotive Lighting*, DARMSTADT, T. U., Darmstadt: Herbert Utz Verlag, 2007, 978-3-8316-0711-2.
- [80] **Böhm, M., et al.** (2007) Improving Detection Distances by an Adaptive Cut-Off Line System. *ISAL 2009*.
- [81] **Totzauer, A.**, "Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung", TU Darmstadt, Darmstadt, Studienarbeit, 2008.
- [82] **Jobstvogt, J.**, "Sicherheitsgewinn durch ein blendfreies Fernlicht", Eigenverlag, im FG Lichttechnik vorhanden, Braunschweig, Diplomarbeit, 2008.
- [83] **Behnke, J. and Behnke, N.**, "Grundlagen der statistischen Datenanalyse - Eine Einführung für Politikwissenschaftler", Vol. B, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006, 978-3-531-14576-1.
- [84] **Pfeiffer, K.-P.** (2006, "Angewandte Statistik I". Verfügbar: [http://www.i-med.ac.at/msig/lehre/lehrunterlagen/ws0607/angew\\_statistik\\_i\\_ws\\_2006.pdf](http://www.i-med.ac.at/msig/lehre/lehrunterlagen/ws0607/angew_statistik_i_ws_2006.pdf)
- [85] **Deutsches Institut für Normung**, "Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung", Vol. DIN EN 12665:2011-09, ed. Ort der Veröffentlichung: Beuth, 2009.
- [86] **Vos, J. J.** (1999) Glare today in historical perspective: towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature. *PUBLICATIONS-COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE CIE*.
- [87] **Wördenweber, B., et al.**, "Automotive Lighting and Human Vision". Berlin, Springer, 2007, ISBN-10: 3540366962.
- [88] **Reidenbach, H. D., et al.** (2008) Fachbeitrag: Blendung durch optische Strahlungsquellen. *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*.
- [89] **Vos, J. J.** (1984) Disability Glare—A State of the Art Report. *Commission Internationale de l'Eclairage Journal*, 3(2), 39–55.
- [90] **Vos, J. J.**, "Contribution of the Fundus Oculi to Entoptic Scatter", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 53, S. 1449-1451, 1963.
- [91] **Vos, J. J. and Boogaard, J.**, "Contribution of the Cornea to Entoptic Scatter", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 53, S. 869-873, 1963.
- [92] **Vos, J. J. and Bouman, M. A.**, "Contribution of the Retina to Entoptic Scatter", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 54, S. 95-100, 1964.
- [93] **Holladay, L. L.**, "Action of a Light-Source in the Field of View in Lowering Visibility", *Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments*, Vol. 14, S. 1-15, 1926.
- [94] **Stiles, W. S.**, "The Effect of Glare on the Brightness Difference Threshold", *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, Vol. 104, S. 322-351, 1929.
- [95] **Stiles, W. S. and Crawford, B. H.**, "The Liminal Brightness Increment for White Light for Different Conditions of the Foveal and Parafoveal Retina", *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, Vol. 116, S. 55-102, 1934.
- [96] **Paramei, G. and Khanh, T. Q.**, "Visual Aging: Older observers are disadvantaged at night driving", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2007, S. 443-450, 978-3-8316-0711-2.
- [97] **Lachenmayr, B. J.**, "Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr". München, Shaker, 1995, ISBN 3-8265-0845-9.
-

- 
- [98] **Lachenmayr, B., et al.**, "Reduced visual function causes higher risks of traffic accidents", *Der Ophthalmologe*, Vol. 95, S. 44-50, 1998.
- [99] **Lachenmayr, B.**, "Verkehrsophthalmologie", *Der Ophthalmologe*, Vol. 103, S. 425-446, 2006.
- [100] **Lachenmayr, B.**, "Verkehrsophthalmologie - Fahreignungsbegutachtung im Straßenverkehr", *Der Ophthalmologe*, Vol. 103, S. 425-446, 2006.
- [101] **Werner, J. S., et al.**, "Light, Vision and Aging", *Optometry and Vision Science*, Vol. 67, S. 214-229, 1990.
- [102] **Sekuler, R. and Sekuler, A. B.**, Eds., *Age-Related Changes, Optical Factors and Neural Processes* (Encyclopedia of Psychology). Oxford University Press, 2000
- [103] **Haegerstrom-Portnoy, G., et al.**, "Seeing into Old Age: Vision Function Beyond Acuity", *Optometry and Vision Science*, Vol. 76, S. 141-158, 1999.
- [104] **Reading, V. M.**, "Disability glare and age", *Vision Research*, Vol. 8, S. 207-14, Feb 1968.
- [105] **Schieber, F.** "Age and Glare Recovery Time for Low-Contrast Stimuli". Verfügbar: <http://www.usd.edu/~schieber/pdf/glare.pdf>
- [106] **Aulhorn, E. and Harms, H.**, "Über die Untersuchung der Nachtfahreignung von Kraftfahrern mit dem Mesoptometer", *Klinische Monatsblätter der Augenheilkunde*, Vol. 157, S. 843-873, 1970.
- [107] **Otte, D., et al.**, "Überprüfung der Sehleistung Unfallbeteiligter im Rahmen der Erhebung am Unfallort", Vorstudie im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1986.
- [108] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung**, "Fahrerlaubnis-Verordnung vom 13. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1980), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 7. Januar 2011 (BGBl. I S. 3) geändert worden ist", 2010.
- [109] **Die Verkehrskommission der DOG**, "Stellungnahme der DOG und des BVA zur Änderung der Fahrerlaubnisverordnung (FeV) vom Dezember 2010", *Der Ophthalmologe*, Vol. 108, S. 296-299, 2011.
- [110] **AAD GbR - Augenärztliche Akademie Deutschland**, Ed., *Empfehlung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft und des Berufsverbandes der Augenärzte Deutschlands zur Fahreignungsbegutachtung für den Straßenverkehr - Anleitung für die augenärztliche Untersuchung und Beurteilung der Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen*. Berlin: Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft, 2008
- [111] **DOG, D. V. d.**, "Empfehlung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft und des Berufsverbandes der Augenärzte Deutschlands zur Fahreignungsbegutachtung für den Straßenverkehr - Anleitung für die augenärztliche Untersuchung und Beurteilung der Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen". Berlin, Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft, 2003.
- [112] **Lüllmann, H.**, "Pharmakologie und Toxikologie". Stuttgart [u.a.]: Thieme, 2010, 978-3-13-368517-7.
- [113] **Adams, A. J., et al.**, "Marijuana, alcohol, and combined drug effects on the time course of glare recovery", *Psychopharmacology (Berl)*, Vol. 56, S. 81-6, Jan 31 1978.
- [114] **Brown, B., et al.**, "Effects of alcohol and marijuana on dynamic visual acuity: I. Threshold measurements", *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 18, S. 441-446, 1975.
- [115] **Adams, A. J. and Brown, B.**, "Alcohol prolongs time course of glare recovery", *Nature*, Vol. 257, S. 481-483, 1975.
- [116] **Sekuler, R. and MacArthur, R. D.**, "Alcohol retards visual recovery from glare by hampering target acquisition", *Nature*, Vol. 270, S. 428-429, 1977.

- 
- 
- [117] **Adams, A. J., et al.**, "Alcohol and marijuana effects on static visual acuity", *Am J Optom Physiol Opt*, Vol. 52, S. 729-35, Nov 1975.
- [118] **Flom, M. C., et al.**, "Alcohol and marijuana effects on ocular tracking", *Am J Optom Physiol Opt*, Vol. 53, S. 764-73, Dec 1976.
- [119] **Yazulla, S.**, "Endocannabinoids in the retina: From marijuana to neuroprotection", *Progress in Retinal and Eye Research*, Vol. 27, S. 501-526, 2008.
- [120] **Gellatly, A. W. and Weintraub, D. J.**, "User Reconfigurations of the De Boer Rating Scale for Discomfort Glare", Ann Arbor, May 1990, 1990.
- [121] **Lukiesh, M. and Guth, S. K.**, "Brightnesses in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD)", *Illuminating Engineering*, Vol. 44, S. 650-670, 1949.
- [122] **Hermion, R. H.**, "The effect of headlight glare on vehicle control and detection of highway vision targets", Southwest Research Institute, San Antonio, 1968.
- [123] **Adrian, W.**, "The principles of disability and discomfort glare", in *Proceedings of the symposium on visibility in the driving task*, College Station, Texas, 1968.
- [124] **Fisher, A. J.**, "The luminous intensity requirements of vehicle front lights for use in towns", *Ergonomics*, Vol. 17, S. 87-103, 1974.
- [125] **de Boer, J. B.**, "Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist", in *Public Lighting*, DE BOER, J. B., Eindhoven, Philips Technical Library, 1967, pp. 11-96.
- [126] **Theeuwes, J., et al.**, "Relation Between Glare and Driving Performance", *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 44, S. 95-107, 2002.
- [127] **Beckman, C., et al.**, "Comparison of three methods of evaluating glare", *Acta Ophthalmologica*, Vol. 70, S. 53-59, 1992.
- [128] **Aslam, T. M., et al.**, "Principles of disability glare measurement: an ophthalmological perspective", *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, Vol. 85, S. 354-360, 2007.
- [129] **Regan, D., et al.**, "Measurement of Glare Susceptability Using Low-Contrast Letter Charts", *Optometry and Vision Science*, Vol. 70, S. 969-975, 1993.
- [130] **Elliott, D. B., et al.**, "The reliability of the Pelli-Robson contrast sensitivity chart", *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol. 10, S. 21-24, 1990.
- [131] **Elliott, D. B., et al.**, "Differences in the legibility of letters at contrast threshold using the Pelli-Robson chart", *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol. 10, S. 323-326, 1990.
- [132] **Schiefer, U., et al.**, "Visuelle Beeinträchtigung von Fahrzeugführern durch einen Front-Fotoblitz unter mesopischen Bedingungen", *Klinische Monatsblätter der Augenheilkunde*, Vol. 02, 1993.
- [133] **Sivak, M., et al.**, "Blue Content of LED Headlamps and Discomfort Glare", in *International Symposium on Automotive Lighting*. Vol. 11 Darmstadt: Herbert Utz Verlag, 2005, pp. 212-219, 3-8316-0499-1.
- [134] **Van Derlofske, J., et al.**, "Spectral Effects of LED Forward Lighting", in *International Symposium on Automotive Lighting*. Vol. 11, DARMSTADT, T. U., Darmstadt: Herbert Utz Verlag, 2005, pp. 201-211, 3-8316-0499-1.
- [135] **Raphael, S., et al.**, "Luminance as a criterion for the evaluation of discomfort and disability glare of headlamps", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2007, S. 427-433, 978-3-8316-0711-2.
- [136] **Völker, S.**, "Do light sources with a high part of shorter wavelength promote safety?", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2007, S. 195-200.



- 
- [137] **Locher, J., et al.**, "Disability Glare of Halogen, Xenon and LED headlamp systems", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2007, 978-3-8316-0711-2.
- [138] **Schiller, C., et al.** (2009, Februar) Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern. *Automobiltechnische Zeitschrift*. S.132-139.
- [139] **Schiller, C. and Khanh, T. Q.**, "Photometrical and Physiological Aspects of Today's LED CAR Headlamps", in *V.I.S.I.O.N. -Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving - Proceedings* Versailles: Société des Ingénieurs de l'Automobile, 2008.
- [140] **Fekete, J., et al.**, "Spectral Dependence of Visibility and Glare", in *International Symposium on Automotive Lighting*, Technische Universität Darmstadt, 2005, S. 430-436, 3-8316-0499-1.
- [141] **Hamm, M.**, "The Glare Discussion Through Gas Discharge Headlamps: An Objective Approach through Physiology and Psychology", in *Progress in Automobile Lighting* Darmstadt: Technische Universität Darmstadt (Eigenverlag), 1997, pp. 226-240.
- [142] **Holladay, L. L.**, "The fundamentals of glare and visibility", *Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments*, Vol. 12, S. 217ff., 1926.
- [143] **Bullough, J. D., et al.**, "An Investigation of Headlamp Glare: Intensity, Spectrum and Size", U.S. Department for Transportation, NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, Washington, D.C. DOT 809 672, 2003.
- [144] **Sprute, J. H.**, "Implications of Adaptive High Beam Headlighting Systems for Discomfort and Disability Glare", in *SAE World Congress & Exhibition*, Detroit, 2009.
- [145] **Bullough, J. D., et al.**, "Discomfort and Disability Glare from Halogen and HID Headlamp Systems", Society of Automotive Engineers, Detroit SAE 2002-01-0010, 2002.
- [146] **Sprute, H., et al.**, "Investigations on Glare Impact at Long Distances", in *International Symposium on Automotive Lighting 2009*, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, 2009, 978-3-8316-0904-8.
- [147] **Commission Internationale de l'Éclairage**, "CIE equations for disability glare", CIE TC 1–50, Wien, 2002.
- [148] **Carraro, U.**, "Die Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern unter besonderer Berücksichtigung einer dynamischen Sehaufgabe", Dissertation, Fakultät für Technische Wissenschaften, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 1984.
- [149] **Vos, J. J.**, "On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation", *Clinical and Experimental Optometry*, Vol. 86, S. 363-70, Nov 2003.
- [150] **Reading, V. M.**, "Disability Glare and Age", *Vision Research*, Pergamon Press, Vol. 8, S. 207-214, 1968.
- [151] **Paramei, G. and Khanh, T. Q.**, "Visual aging: Older observers are disadvantaged at night driving", vorgetragen während der International Symposium on Automotive Lighting 2007, Darmstadt, 2009.
- [152] **Tengroth, B., et al.**, "Readaptation time after photo stress. Readaptation time as a function of oxygen concentration.", *Acta Ophthalmologica*, Vol. 54, S. 507-516, 1976.
- [153] **Höglman, B., et al.**, "Readaptation time after photo stress. Alcohol-induced acute and post-alcohol 'hangover' changes in ocular readaptation time.", *Psychopharmacology*, Vol. 53, 18.07.1977 1977.
- [154] **Paul, B. and Einhorn, H. D.**, "Discomfort glare from small light sources", *Lighting Research and Technology*, Vol. 31, S. 139-144, December 1, 1999 1999.
-

- 
- [155] **Arditi, A. and Cagenello, R.**, "On the statistical reliability of letter-chart visual acuity measurements", *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 34, S. 120-9, January 1, 1993 1993.
- [156] **Corrsys Datron.** (2008, "Datenblatt zum Correvit Sensor S-350". Verfügbar: [http://www.corrsys-datron.com/Support/Data\\_Sheets/Produktpalette/a\\_Sensoren/cds-d\\_S-350\\_d.pdf](http://www.corrsys-datron.com/Support/Data_Sheets/Produktpalette/a_Sensoren/cds-d_S-350_d.pdf)
- [157] **Manz, K.**, "Skript zur Vorlesung: Automobile Licht und Displaytechnik (Die Blendung)", 2006.
- [158] **Knobloch, V.**, "Aufbau und Validierung eines variablen Versuchsaufbaus für Außeneinsätze mit Vehicle-to-Vehicle-Communication", in *Studienarbeit* Darmstadt, 2007.
- [159] **Helmers, G. and Rumar, K.**, "High beam intensity and obstacle visibility", *Lighting Research and Technology*, Vol. 7, S. 35-42, March 1, 1975 1975.
- [160] **Rumar, K.**, "Intensity of High-Beam Headlights", in *Progress in Automobilew Lighting 2001*, Technische Universität Darmstadt, 2001, S. 829-848, 3-89675-971-X.

---

## Eigene Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

---

---

### Als Autor

---

- Sprute, J. H.; Khanh, Tran Quoc:** *“Approval Requirements for a Front-Lighting System with Variable Cut-Off Line in Europe”*. In 7th International Symposium on Automotive Lighting, Technische Universität Darmstadt, Khanh, T. Q. (Hrsg.), München: Utz Verlag, 2007, pp. 1-5, 978-3-8316-0711-2.
- Sprute, J. H.:** *“Reduction of Glare and Improvement of Visibility Distance by AFS”*. DELRIS - Darmstadt Expert Lighting Research International Summit, Technische Universität Darmstadt, 2008
- Sprute, J. H.; Haferkemper, Nils; Reeber, D.; Khanh, Tran Quoc:** *“Influence of new High Beam Assistance Systems on Driver Behaviour and their Potentials”*. International Conference - V.I.S.I.O.N., Versailles, 2008
- Sprute, J. H.; Khanh, Tran Quoc; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Brückner, Stefan; Knobloch, V.:** *„Bewertung der Blendbelastung neuartiger Kfz-Scheinwerfersysteme“*. Licht 2008, Ilmenau, 2008
- Sprute, J. H.; Söllner, S.; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Zydek, B.; Khanh, Tran Quoc:** *“Investigations on Glare Impact at Long Distances”*. In 8<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting 2009, Technische Universität Darmstadt, S. 307-313, 978-3-8316-0904-8. 2009
- Sprute, J. H.; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Khanh, Tran Quoc:** *“Implications of Adaptive High Beam Headlighting Systems for Discomfort and Disability Glare”*. In: SAE World Congress. 2009, Detroit, 2009
- Sprute, J. H.; Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc:** *“Fernlichtnutzung: Fehlbedienung und Risikokompensation durch Autofahrer – Potenziale für Fernlichtassistenzsysteme”*. In: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2010
- Sprute, Jan Holger; Söllner, Stefan; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Zydek, Bastian; Khanh, Tran Quoc:** *“Dynamic Glare Assessment – Defining Undue Glare in Night-time Driving”*. In 9<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting 2011, Technische Universität Darmstadt, 978-3-8316-4093-5, 2011

---

### Als Co-Autor

---

- Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc; Sprute, J. H.:** *„Untersuchungen zur Messgenauigkeit der Leuchtdichte und des Farbortes aktueller Farb- und Spektralmessgeräte“*. In: Licht 2008, Ilmenau., 2008
- Haferkemper, Nils; Sprute, J. H.; Schiller, Christoph; Khanh, Tran Quoc:** *“Experiment Series on the Effect of DRL usage on Motorcycle Conspicuity”*. In 8<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting 2009, Technische Universität Darmstadt, S. 307-313, 978-3-8316-0904-8. 2009

- 
- Haferkemper, Nils; Sprute, J. H.; Schiller, Christoph; Khanh, Tran Quoc:** *“The Effect of LED Daytime Running Lights on Motorcycle Conspicuity and Detection Distance Estimation - Latest Test Results”*. In: SAE World Congress 2010, Detroit, 2010
- Haferkemper, Nils; Sprute, J. H.; Schiller, Christoph ; Khanh, Tran Quoc:** *„Untersuchung der Auffälligkeit, Erkennbarkeit und Geschwindigkeitseinschätzung von Motorrädern mit LED-Tagfahrlicht“*. In: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2010
- Haferkemper, Nils; Sprute, J. H.; Schiller, Christoph; Khanh, Tran Quoc:** *„Untersuchung zum Einsatz von LED-Tagfahrlicht an Motorrädern“*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2010
- Khanh, Tran Quoc; Sprute, J. H.:** *„LED-Technologie für eine energieeffiziente und normgerechte Straßenbeleuchtung“*. In: Innovative Beleuchtung mit LED 2008 : 6. Tagung, Düsseldorf, 18. bis 19. November 2008 / VDI Kompetenzfeld Optische Technologien. VDI-Berichte ; 2059. VDI-Verl., Düsseldorf, pp. 37-45., 2008
- Khanh, Tran Quoc; Sprute, J. H.; Böll, Marvin ; Groh, Andreas; Schiller, Christoph:** *“HID vs. Tungsten Halogen Headlamps: Driver Preferences and Visibility Distance”*. In: SAE World Congress 2009, Detroit, 2009
- Schiller, Christoph; Haferkemper, Nils; Sprute, J. H.; Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc:** *„Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern“*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2008
- Schiller, Christoph; Sprute, J. H.; Haferkemper, Nils; Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc:** *„Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern“*. In: Automobiltechnische Zeitschrift: ATZ (Nr. 2), 2009
- Söllner, Stefan; Sprute, Holger; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc:** *“Field Study: Driver Data on Visual Topics”*. In 9<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting 2011, Technische Universität Darmstadt, 978-3-8316-4093-5, 2011

---

#### **Betreute studentische Arbeiten**

---

- Hohm, Andre:** *“Physiologische und Photometrische Untersuchungen zur Herleitung von Randbedingungen für eine Abblendautomatik”*., Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2005
- Knobloch, Verena:** *“Aufbau und Validierung eines variablen Versuchsaufbaus für Außeneinsätze mit Vehicle-to-Vehicle-Communication”*., Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2007
- Mäncher, Martin:** *“Physiologische Untersuchung von Kraftfahrzeugsignallampen mit LEDs und Glühlampen als Lichtquellen”*. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2004
- Marx, Damien:** *“Design of a New Vehicle Coordinate System Based Eye Tracker”*. Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Totzauer, Alexander:** *“Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung”*., Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2008
- Totzauer, Alexander:** *“Implementierung einer adaptiven Scheinwerferansteuerung auf einem Evaluierungsboard“*., Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2009
- Zydek, Bastian:** *“Entwicklung eines Freiversuchstandes zur dynamischen Messung der Blendung durch Fernlichtassistenzsysteme”*. Studienarbeit, FG Lichttechnik, TU Darmstadt, 2009
-

## Anhang A Fragebogen Akzeptanztest

Nur vom Versuchsleiter einzutragen: BV EW ☐ BEW ☐ ☐ Uhrzeit \_\_\_\_\_

### Fragebogen zum Fahrtest mit GLW

Lieber Testteilnehmer,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, am späten Abend an unserem Fahrversuch teilzunehmen. Das FG Lichttechnik beschäftigt sich derzeit mit neuen Fahrerassistenzsystemen.

Mit Hilfe dieses Fragebogens soll ermittelt werden, inwieweit die Fahrer das System GLW hilfreich finden. Der Beitrag des Systems zur Verkehrssicherheit soll durch die Testteilnehmer eingeschätzt werden.

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Alter: \_\_\_\_\_ Geschlecht: m ☐ w ☐

Tragen Sie eine Brille? Nein ☐ Ja ☐

Wenn ja: kurz- oder weitsichtig? K ☐ W ☐

Sind Sie farbfehlsichtig? Nein ☐ Ja ☐

Haben Sie andere Sehfehler? Nein ☐ Ja ☐

Ich besitze den Führerschein seit (Jahr): \_\_\_\_\_

Wie häufig fahren Sie Auto?

☐ Oft: Mehr als 4 mal pro Woche

☐ Normal: Mehr als 1mal pro Woche aber weniger als 4 mal pro Woche

☐ Selten: Mehr als 1mal im Monat aber weniger als 5 mal im Monat

☐ Sehr selten: Weniger als 20 mal im Jahr

Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen, indem Sie den entsprechenden Kreis ankreuzen:

1. Ich fühle mich mit dem automatischen System wohl.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2. Es ist deutlich zu erkennen, dass das System den Gegenverkehr entblendet.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Ich würde früher abblenden als das automatische System.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. Dieses System erkennt andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Ich kann jederzeit weit genug sehen.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. Ich würde später abblenden als das automatische System.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7. Ein solches System erhöht die Verkehrssicherheit.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

8. Mit dem System werden Fußgänger und Radfahrer mehr geblendet, als ohne das System.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9. Dieses System ist hilfreich.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10. Ich habe nicht das Gefühl, dass andere Fahrer sich durch das System gestört fühlen.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11. Ich finde diese Technologie interessant.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12. Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13. Ich finde, dieses System sollte als selbstverständliche Ausstattung in jedes Auto (wie Airbag oder ABS).

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. Die Geschwindigkeit des Übergangs von Fernlicht auf Abblendlicht ist...

Viel zu schnell	Eher zu schnell	Genau richtig	Eher zu langsam	Viel zu langsam
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

15. Mit einem solchen System können Fußgänger und Fahrradfahrer eher erkannt werden.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16. Durch das System kann ich mich mehr auf das Fahren konzentrieren.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

17. Beim Fahren hatte ich das Gefühl, das Fernlicht per Hand steuern zu wollen.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

18. Die Lichtverteilung / ausgeblendete Sektoren sind deutlich erkennbar.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19. Das Regeln der Leuchtweite im Abblendlichtmodus ist deutlich erkennbar.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

20. Meine Sichtweite bei System XXX ist deutlich höher als bei normalem Abblendlicht.

Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



## Anhang B Ergebnisse des Blendungstests (psychologische Blendung)

**Tabelle 19: Regressionskoeffizienten zu psychologischen Blendbewertung aller Testpersonen sowie Mittelwerte und Konfidenzintervalle**

	Halogen		LED		HID	
	Achsenabschnitt	Steigung	Achsenabschnitt	Steigung	Achsenabschnitt	Steigung
Testperson 1	73,4206793	11,8442412	60,9506569	19,4531545	65,520831	14,4563653
Testperson 2	54,6606735	25,8020445	41,816435	26,5198961	64,9908897	25,7744754
Testperson 3	72,8882015	18,5959762	39,3713476	22,5318367	63,2914013	22,6525516
Testperson 4	70,5424159	8,66566117	62,2424105	15,4845522	64,8351395	12,5886502
Testperson 5	53,0525426	20,5986583	57,5279864	28,0147987	69,2951956	17,0353796
Testperson 6	65,8619473	22,9084843	47,7589448	25,7653047	74,8338663	22,4243789
Testperson 7	69,2667946	16,7713531	52,7684403	22,8971324	50,7238684	23,3516168
Testperson 8	67,4142133	13,2756333	44,0237383	28,4924211	60,6555369	11,8972969
Testperson 9	53,5661279	16,4935706	0	0	51,8850557	17,0364701
Mittelwert	64,5192884	17,2172914	50,807495	23,6448871	62,8924205	18,5796872
Standardabweichung	8,41816444	5,45070438	18,8552649	8,93222309	7,6899163	5,10173035
Untere Grenze Konfidenzintervall	61,8044304	15,4594393	44,726672	20,7642451	60,4124225	16,9343792
Obere Grenze Konfidenzintervall	67,2341464	18,9751436	56,8883179	26,525529	65,3724185	20,2249952
Signifikanzniveau (0,99)	2,58					

## Anhang C Ergebnisse der Begutachtung des Unfall Hof-Töpen

Die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen zum Unfallhergang sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Der Fußgänger ist für einen Fahrer eines Kfz ab der Entfernung sichtbar, ab der die verfügbare Leuchtdichtedifferenz  $L_{\text{vorh}}$  größer als die Schwellenleuchtdichte  $L_S$  ist.

Entfernungen, für die dies nicht gilt sind, sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 grau unterlegt.

**Tabelle 20: Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Abblendlicht**

Abblendlicht	Körper		Gesicht		Hose		Hund	
Entfernung	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$
20	0,05	0,28	0,07	0,33	0,07	2,14	0,06	0,51
30	0,06	0,11	0,11	0,16	0,11	0,36	0,08	0,34
40	0,07	0,08	0,13	0,14	0,13	-0,08	0,09	-0,15
50	0,07	0,04	0,15	0,02	0,15	-0,15	0,10	-0,17
60	0,07	0,02	0,18	0,03	0,18	-0,23	0,12	-0,24
75	0,10	0,01	0,27	0,02	0,27	-0,19	0,16	-0,20
100	0,10	-0,01	0,30	-0,01	0,30	-0,14	0,17	-0,14

**Tabelle 21: Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Fernlicht**

Fernlicht	Körper		Gesicht		Hose		Hund	
Entfernung	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$	$L_S$	$L_{\text{vorh}}$
40	0,09	0,89	0,18	0,68	0,18	1,47	0,13	0,69
45	0,09	0,77	0,18	0,60	0,18	1,26	0,12	0,36
50	0,09	0,69	0,19	0,56	0,19	0,73	0,13	0,52
60	0,10	0,53	0,24	0,44	0,24	0,58	0,15	0,10
75	0,11	0,27	0,30	0,25	0,30	0,16	0,19	-0,08
100	0,15	0,15	0,44	0,13	0,44	-0,23	0,26	-0,08

Wird eine Blendung durch Gegenverkehr unterstellt, so ergeben sich höhere Anforderungen an den Leuchtdichteunterschied des Sichtzieles. Die Erkennungsentfernungen unter Blendeinfluss lassen sich aus Tabelle 22 und Tabelle 23 entnehmen.

Tabelle 22: Sichtbarkeitsentfernung bei nach ECE-Norm eingestelltem Abblendlicht, mit Blendung

Abblendlicht	Körper		Gesicht		Hose		Hund	
Entfernung	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>
20	0,06	0,28	0,09	0,33	0,09	2,14	0,07	0,53
30	0,08	0,11	0,13	0,16	0,13	0,36	0,1	0,09
40	0,08	0,08	0,17	0,14	0,17	-0,08	0,12	0
50	0,09	0,04	0,19	0,02	0,19	-0,15	0,13	-0,02
60	0,1	0,02	0,23	0,03	0,23	-0,23	0,15	-0,02
75	0,13	0,01	0,33	0,02	0,33	-0,19	0,21	-0,02
100	0,13	-0,01	0,4	-0,01	0,4	-0,14	0,23	-0,01

Tabelle 23: Sichtbarkeitsentfernung bei Nutzung des Fernlichtes und Blendung

Fernlicht	Körper		Gesicht		Hose		Hund	
Entfernung	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>	L <sub>S</sub>	L <sub>vorh</sub>
40	0,11	0,89	0,21	0,68	0,21	1,47	0,15	0,59
45	0,1	0,77	0,21	0,6	0,21	1,26	0,15	0,36
50	0,11	0,69	0,23	0,56	0,23	0,73	0,16	0,55
60	0,12	0,53	0,28	0,44	0,28	0,58	0,18	0,25
75	0,14	0,27	0,36	0,25	0,36	0,16	0,22	0,1
100	0,18	0,15	0,53	0,13	0,53	-0,23	0,31	0,06

## Anhang D Blendungstests (physiologisch, Abhängigkeit von Lichtart)

Tabelle 24: Koeffizienten und deren Konfidenzintervalle inkl. individueller Rangfolge für den Schwellenleuchtdichteunterschied

Testperson	Lichtart	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze	Rang pro Testperson
1	Halogen	,032	,001	,998	37,632	,000	,030	,034	1
1	LED	,021	,001	,995	21,914	,000	,019	,024	2
1	Xenon	,021	,001	,996	25,151	,000	,018	,023	3
2	Halogen	,028	,003	,984	11,003	,000	,021	,035	2
2	LED	,035	,003	,987	12,459	,000	,027	,043	1
2	Xenon	,023	,006	,868	3,909	,011	,008	,038	3
3	Halogen	,178	,006	,998	29,702	,000	,161	,194	1
3	LED	,125	,016	,968	7,735	,002	,080	,170	2
3	Xenon	,070	,005	,992	15,442	,000	,057	,082	3
4	Halogen	,073	,003	,996	24,287	,000	,065	,081	1
4	LED	,024	,007	,826	3,281	,022	,005	,043	2
4	Xenon	,022	,001	,996	26,127	,000	,020	,024	3
5	Halogen	,045	,007	,942	6,251	,002	,027	,064	1
5	LED	,023	,001	,995	19,576	,000	,020	,026	3
5	Xenon	,026	,002	,987	15,036	,000	,022	,030	2
6	Halogen	,032	,004	,966	7,497	,002	,020	,044	3
6	LED	,045	,005	,978	9,334	,001	,032	,058	1
6	Xenon	,037	,013	,783	2,811	,038	,003	,071	2
7	Halogen	,023	,001	,997	23,947	,000	,020	,026	2
7	LED	,019	,004	,939	5,475	,005	,010	,029	3
7	Xenon	,026	,001	,998	35,857	,000	,024	,028	1
8	Halogen	,052	,008	,951	6,840	,001	,032	,072	1
8	LED	,034	,006	,949	6,043	,004	,018	,049	2
8	Xenon	,031	,004	,960	8,387	,000	,022	,040	3

Tabelle 25: Koeffizienten und deren Konfidenzintervalle inkl. individueller Rangfolge für den Weberkontrast

Testperson	Lichtart	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		
		Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze	Rang pro Testperson
1	Halogen	,165	,020	,965	8,241	,000	,114	,217	3
1	LED	,205	,021	,975	9,894	,000	,152	,258	2
1	Xenon	,241	,019	,985	12,635	,000	,192	,290	1
2	Halogen	,270	,090	,833	3,008	,040	,021	,520	3
2	LED	,658	,069	,979	9,533	,001	,466	,849	1
2	Xenon	,344	,033	,977	10,279	,000	,258	,430	2
3	Halogen	1,070	,054	,995	19,722	,000	,919	1,220	2
3	LED	1,630	,461	,871	3,538	,024	,351	2,910	1
3	Xenon	1,028	,119	,974	8,632	,001	,697	1,358	3
4	Halogen	,416	,082	,915	5,065	,004	,205	,627	1
4	LED	,219	,145	,561	1,517	,190	-,152	,591	3
4	Xenon	,250	,024	,978	10,593	,000	,190	,311	2
5	Halogen	,475	,161	,797	2,954	,032	,062	,889	3
5	LED	,379	,050	,967	7,540	,002	,239	,518	1
5	Xenon	,515	,036	,985	14,171	,000	,426	,604	2
6	Halogen	,291	,097	,832	3,001	,040	,022	,560	3
6	LED	,830	,121	,960	6,857	,002	,494	1,166	2
6	Xenon	,694	,257	,771	2,705	,043	,035	1,353	1
7	Halogen	,092	,042	,740	2,202	,092	-,024	,209	3
7	LED	,349	,065	,937	5,345	,006	,168	,531	2
7	Xenon	,450	,010	,999	44,271	,000	,422	,478	1
8	Halogen	,521	,159	,826	3,271	,022	,112	,931	2
8	LED	,445	,036	,987	12,393	,000	,345	,545	3
8	Xenon	,623	,069	,965	9,027	,000	,454	,792	1

## Anhang E Relevante Photometrische Anforderungen nach ECE-R123 an eine GLW

Table 1: Passing beam photometric requirements tabled requirements expressed in lux @ 25m			Position /deg			passing beam								
			horizontal		vertical	class C		class V		class E		class W		
	No	Element	at/	from	to	at	min	max	min	max	min	max	min	max
Part A	1	B50L	4/	L	3.43		U	0.57		0.4		0.4		0.7
	2	HV	4/	V			H			0.7				0.7
	3	BR	4/	R	2.5		U	1	0.2	2	0.1	1	0.2	2
	4	Segment BRR	4/	R	8	R 20	U	0.57		4		1		4
	5	Segment BLL	4/	L	8	L 20	U	0.57		0.7		1		1
	6	P		L	7		H		0.1				0.1	
	7	Zone III (as specified by Table 3)						0.7		0.7		1		1
	8a	S50, S50LL, S50RR	5/				U	4	0.1	2/		0.1	2/	0.1
	9a	S100, S100LL,S100RR	5/				U	2	0.2	2/		0.2	2/	0.2
	10	50 R		R	1.72		D	0.86			6			
	11	75 R		R	1.15		D	0.57	12			18		24
	12	50 V		V			D	0.86	6		6	12		12
	13	50 L		L	3.43		D	0.86	4.2	15 9/	4.2	15 9/	8	30 9/
	14	25 LL		L	16		D	1.72	1.4		1	1.4		4
	15	25 RR		R	11		D	1.72	1.4		1	1.4		4
	16	Segment 20 and below it		L	3.5	V	D	2						20
	17	Segment 10 and below it		L	4.5	R 2.0	D	4		14	1/	14	1/	8
	18	E <sub>max</sub> 3/							20	50	10	50	20	90 8/ 35 80 2/

Part B (bending modes): Table 1 Part A applies, however with the lines Nos. 1, 2, 7, 13 and 18 being replaced by those listed hereunder

Part B	1	B50L	4/	L	3.43		U	0.57		0.6		0.6				0.9	
	2	HV	4/							1		1					
	7	Zone III (as specified by Table 3)								1		1		1		1	
	13	50L		L	3.43		D	0.86	2		2		4		4		
	18	E <sub>max</sub>	6/						12	50	6	50	12	90	8/	24	80

1/ max 18 lx, if the system is designed to provide also a class W passing beam.

3/ Position requirements according to the provisions of Table 2 below ("Segment E<sub>max</sub>").

5/ Position requirements according to the provisions of Table 5 below.

7/ One pair of position lamps, being incorporated with the system or being intended to be installed together with the system may be activated according to the indications of the applicant.

8/ Requirements according to the provisions indicated in Table 6 below apply in addition.

9/ The max. value may be multiplied by 1.4, if it is guaranteed according to the manufacturer's description that this value will not be exceeded in use, either by means of the system or, if the system's use is confined to vehicles, providing a corresponding stabilization/ limitation of the system's supply, as indicated in the communication form.

2/ requirements according to the provisions indicated in Table 4 below apply in addition

4/ the contribution of each side of the system, when measured according to the provisions of Annex 9 to this Regulation shall not be less than 0.1lx.

6/ Position requirements as indicated in paragraph 6.2.6.2. of this Regulation

**Table 2:** Passing beam elements angular position/extend, additional requirements

	angular position / extend in deg	Class C passing beam		Class V passing beam		Class E passing beam		Class W passing beam	
No	beam part designation and requirement	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical
2.1.	Emax shall not be positioned outside of the rectangle extending (above "segment Emax")	0.5 L to 3 R	0.3 D to 1.72D		0.3 D to 1.72D	0.5 L to 3 R	0.1 D to 1.72D	0.5 L to 3 R	0.3 D to 1.72D
2.2.	the "cut-off" and part(s) of shall: - comply with the requirements of paragraph 1. of Annex 8 to this Regulation and be positioned with its " kink" at V-V and								
	- be positioned with its "flat horizontal part"		at V = 0.57 D		not above 0.57D not below 1.3D		not above 0.23D 8/ not below 0.57D		not above 0.23D not below 0.57D

8/ Requirements according to the provisions indicated in Table 6 below apply in addition.

**Table 3:** Passing beam zones III, defining corner points

Angular Position in Deg	Corner Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Zone III a for class C or class V Passing Beam	horizontal	8 L	8 L	8 R	8 R	6 R	1.5 R	V-V	4 L
	vertical	1 U	4 U	4 U	2 U	1.5 U	1.5 U	H-H	H-H
Zone III b for class W or class E Passing Beam	horizontal	8 L	8 L	8 R	8 R	6 R	1.5 R	0.5 L	4 L
	vertical	1 U	4 U	4 U	2 U	1.5 U	1.5 U	0.34 U	0.34 U



**Table 4:** Additional provisions for class W passing beam, expressed in lx@25m

4.1.	Definition and Requirements for Segments E, F1, F2, and F3 (not shown in Fig.1 above)
	Not more than 0.2lx are allowed: a) on a segment E extending at U 10 deg from L 20 to R 20 deg and b) on three vertical segments F1, F2 and F3 at horizontal positions L10 deg, V and R 10 deg, each extending from U 10 to U 60 deg.
4.2.	Alternative/ Additional Set of Requirements for Emax, segment 20 and segment 10: Table 1 Part A or B applies, however with the max requirements in lines No. 16, 17 and 18 being replaced by those indicated hereunder
	If, according to the applicants specification according to paragraph 2.2.2.(e) of this Regulation a class W passing beam is designed to produce on segment 20 and below it not more than 10lx and on segment 10 and below it not more than 4lx, the design value for Emax of that beam shall not exceed 100lx

**Table 5:** Overhead sign requirements, angular position of measurement points

Point Designation	S50LL	S50	S50RR	S100LL	S100	S100RR
Angular Position in Deg	4 U / 8 L	4 U / V-V	4 U / 8 R	2 U / 4 L	2 U / V-V	2 U / 4 R

**Table 6:** Additional provisions for class E passing beam

Table 1 Part A or B and Table 2 above apply, however with the lines No.1 and 18 of Table 1 and item 2.2. of Table 2 being replaced as indicated hereunder				
Item	Designation	Line 1 of Table 1 above, Part A or B	Line 18 of Table 1 above, Part A or B	Item 2.2. of Table 2 above
No.	Data Set	EB50L in lx@25m	Emax in lx@25m	cut-off flat part aimed in deg
		max	max	not above
6.1.	E1	0.6	80	0.34 D
6.2.	E2	0.5	70	0.45 D
6.3.	E3	0.4	60	0.57 D

---

## Anhang F      Aktivierungsbedingungen für verschiedene Abblendlichtklassen

### 6.22.7.4.      Automatic operation of the AFS

The changes within and between the provided classes and their modes of the AFS lighting functions as specified below, shall be performed automatically and such that no discomfort, neither for the driver nor for other road users, is caused.

The following conditions apply for the activation of the classes and their modes of the passing beam and, where applicable, of the main-beam.

- 6.22.7.4.1.      The class C mode(s) of the passing beam shall be activated if no mode of another passing beam class is activated.
- 6.22.7.4.2.      The class V mode(s) of the passing beam shall not operate unless one or more of the following conditions is/are automatically detected (V-signal applies):
  - (a)    roads in built-up areas and the vehicle's speed not exceeding 60 km/h;
  - (b)    roads equipped with a fixed road illumination, and the vehicle's speed not exceeding 60 km/h;
  - (c)    a road surface luminance of 1 cd/m<sup>2</sup> and/or a horizontal road illumination of 10 lx being exceeded continuously;
  - (d)    the vehicle's speed not exceeding 50 km/h.
- 6.22.7.4.3.      The class E mode(s) of the passing beam shall not operate unless the vehicle's speed exceeds 70 km/h and one or more of the following conditions is/are automatically detected.
  - (a)    The road characteristics correspond to motorway conditions<sup>8/</sup> and/or the vehicle's speed exceeds 110 km/h (E-signal applies).
  - (b)    In case of a class E mode of the passing beam which, according to the system's approval documents /communication sheet, complies with a 'data set' of Table 6 of Annex 3 of Regulation No. 123, only.
    - Data set E1: the vehicle's speed exceeds 100 km/h (E1-signal applies);
    - Data set E2: the vehicle's speed exceeds 90 km/h (E2-signal applies);
    - Data set E3: the vehicle's speed exceeds 80 km/h (E3-signal applies).

---

<sup>8/</sup>      Traffic directions being separated by means of road construction, or, a corresponding lateral distance of opposing traffic is identified. This implies a reduction of undue glare from vehicles headlamps in opposing traffic.

---

## Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.